

Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques

Édition 2008

Mise à jour en 2010



**Organisation
météorologique
mondiale**

Temps • Climat • Eau

OMM N° 8

Temps • Climat • Eau

Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques

OMM-N° 8

Édition 2008

Mise à jour en 2010



**Organisation
météorologique
mondiale**
Temps • Climat • Eau

2014

REMERCIEMENTS

L'OMM tient à remercier Météo-France pour sa précieuse contribution à la préparation (traduction, édition et mise en page) de cette publication en français.

OMM-N° 8

© Organisation météorologique mondiale, 2008

L'OMM se réserve le droit de publication en version imprimée ou électronique ou sous toute autre forme et dans n'importe quelle langue. De courts extraits des publications de l'OMM peuvent être reproduits sans autorisation, pour autant que la source complète soit clairement indiquée. La correspondance relative au contenu rédactionnel et les demandes de publication, reproduction ou traduction partielle ou totale de la présente publication doivent être adressées au:

Président du Comité des publications
Organisation météorologique mondiale (OMM)
7 bis, avenue de la Paix
Case postale 2300
CH-1211 Genève 2, Suisse

Tél.: +41 (0) 22 730 84 03
Fax: +41 (0) 22 730 80 40
Courriel: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-20008-2

NOTE

Les appellations employées dans les publications de l'OMM et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'Organisation météorologique mondiale, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de certaines sociétés ou de certains produits ne signifie pas que l'OMM les cautionne ou les recommande de préférence à d'autres sociétés ou produits de nature similaire dont il n'est pas fait mention ou qui ne font l'objet d'aucune publicité.

Les constatations, interprétations et conclusions exprimées dans les publications de l'OMM portant mention d'auteurs nommément désignés sont celles de leurs seuls auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'OMM ou de ses Membres.

SUIVI DES RÉVISIONS DE LA PUBLICATION

PRÉFACE

L'un des buts de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) consiste à coordonner les activités de ses 188 Membres en matière de production de données et d'informations sur le temps, le climat et l'eau, conformément à des normes convenues au niveau international. Dans ce contexte, chaque session du Congrès météorologique mondial adopte des Règlements techniques définissant les pratiques et les procédures que les Membres de l'OMM doivent appliquer en matière de météorologie. Ces Règlements techniques sont complétés par un certain nombre de Manuels et de Guides décrivant de manière plus détaillée les pratiques, procédures et spécifications que les Membres sont priés de suivre et de mettre en œuvre. Les Manuels contiennent des pratiques obligatoires, tandis que les Guides comme celui-ci ne contiennent que des recommandations.

La première édition du *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* a été publiée en 1954 et comportait douze chapitres. Depuis lors, la normalisation est demeurée une activité centrale de la Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO), qui révise régulièrement le contenu du Guide et recommande des ajouts ou des modifications, le cas échéant.

L'édition actuelle, qui est la septième, est une version entièrement révisée qui comprend des sujets et des chapitres supplémentaires pour tenir compte des progrès technologiques récents. Comme les précédentes éditions, elle a pour but d'offrir des conseils exhaustifs et actualisés sur les pratiques les plus efficaces pour effectuer des observations et des mesures météorologiques. Elle est le fruit des efforts conjugués de 42 experts venus de 17 pays et elle a été adoptée par la quatorzième session de la CIMO (Genève, décembre 2006).

Le présent Guide contient une description de la plupart des instruments, systèmes et techniques couramment employés, depuis le plus simple jusqu'au plus complexe et sophistiqué ; toutefois, il ne tente pas d'aborder les méthodes et les instruments qui ne sont employés que dans la recherche ou à titre expérimental. Par ailleurs, il n'a pas pour vocation

d'être un mode d'emploi détaillé à l'intention des observateurs et des techniciens ; il est plutôt destiné à servir de point de départ à la rédaction de manuels par des Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) ou d'autres usagers de systèmes d'observation pour répondre à leurs besoins particuliers. Au demeurant, le Guide ne fournit pas de spécification sur l'architecture détaillée des instruments car cela pourrait compromettre leur évolution future. Il semblait préférable de limiter la normalisation aux prescriptions essentielles et de ne formuler de recommandations que pour les éléments qui sont généralement les plus courants dans les différentes configurations d'un instrument ou d'un système de mesure donné.

Si ce Guide a été rédigé avant tout à l'intention des SMHN, de nombreux autres organismes et établissements de recherche et d'enseignement qui effectuent des observations météorologiques l'ont trouvé utile ; leurs demandes ont donc été prises en compte dans l'élaboration du document. En outre, de nombreux fabricants d'instruments ont reconnu que le Guide était utile pour élaborer et produire des instruments et des systèmes spécialement adaptés aux besoins des Membres. Compte tenu de la demande considérable dont cette publication fait l'objet, il a été décidé de la mettre à la disposition de tous les utilisateurs intéressés sur le site web de l'OMM.

Dès lors, au nom de l'OMM, je souhaite exprimer ma gratitude à tous les SMHN, les commissions techniques, les équipes d'experts et les personnes qui ont contribué à cette publication.



(M. Jarraud)
Secrétaire général

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
PARTIE I. MESURE DE VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES	
CHAPITRE 1. Généralités	I.1-1
CHAPITRE 2. Mesure de la température	I.2-1
CHAPITRE 3. Mesure de la pression atmosphérique	I.3-1
CHAPITRE 4. Mesure de l'humidité	I.4-1
CHAPITRE 5. Mesure du vent en surface	I.5-1
CHAPITRE 6. Mesure des précipitations	I.6-1
CHAPITRE 7. Mesure du rayonnement	I.7-1
CHAPITRE 8. Mesure de la durée d'insolation	I.8-1
CHAPITRE 9. Mesure de la visibilité	I.9-1
CHAPITRE 10. Mesure de l'évaporation	I.10-1
CHAPITRE 11. Mesure de l'humidité du sol	I.11-1
CHAPITRE 12. Mesure de la pression, de la température et de l'humidité en altitude	I.12-1
CHAPITRE 13. Mesure du vent en altitude	I.13-1
CHAPITRE 14. Observation du temps présent et passé et de l'état du sol	I.14-1
CHAPITRE 15. Observation des nuages	I.15-1
CHAPITRE 16. Mesure de l'ozone	I.16-1
CHAPITRE 17. Mesure de la composition de l'atmosphère	I.17-1

Page

PARTIE II. SYSTÈMES D'OBSERVATION

	<i>Page</i>
CHAPITRE 1. Mesures aux stations météorologiques automatiques	II.1-1
CHAPITRE 2. Mesures et observations aux stations météorologiques aéronautiques	II.2-1
CHAPITRE 3. Observations d'aéronefs	II.3-1
CHAPITRE 4. Observations maritimes	II.4-1
CHAPITRE 5. Techniques spéciales d'obtention de profils de la couche limite et de la troposphère	II.5-1
CHAPITRE 6. Mesures effectuées dans la stratosphère et la mésosphère à l'aide de fusées	II.6-1
CHAPITRE 7. Localisation des sources d'atmosphériques	II.7-1
CHAPITRE 8. Observations satellitaires	II.8-1
CHAPITRE 9. Mesures radar	II.9-1
CHAPITRE 10. Techniques d'observation par ballons-météorologiques	II.10-1
CHAPITRE 11. Observations urbaines	II.11-1
CHAPITRE 12. Mesures de météorologie routière	II.12-1

PARTIE III. ASSURANCE DE LA QUALITÉ ET GESTION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

CHAPITRE 1. Gestion de la qualité	III.1-1
CHAPITRE 2. Échantillonnage des variables météorologiques	III.2-1
CHAPITRE 3. Réduction des données	III.3-1
CHAPITRE 4. Essais, étalonnage et comparaisons	III.4-1
CHAPITRE 5. Formation des spécialistes des instruments	III.5-1
LISTE DES CONTRIBUTEURS AU GUIDE	III.5-21

PARTIE I

MESURE DE VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES

PARTIE I. MESURE DE VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS	I.1-1
1.1 Observations météorologiques	I.1-1
1.2 Systèmes d'observation météorologiques	I.1-2
1.3 Prescriptions générales pour une station météorologique	I.1-3
1.4 Exigences générales en matière d'instruments	I.1-6
1.5 Étalons et définitions	I.1-7
1.6 Incertitudes de mesure	I.1-9
Annexe 1.A. Centres régionaux	I.1-17
Annexe 1.B. Classification de sites pour les stations terrestres d'observation	I.1-19
Annexe 1.C. Description de l'exposition des stations	I.1-30
Annexe 1.D. Exigences concernant l'incertitude des mesurages opérationnels et performance des instruments	I.1-32
Références et autres lectures	I.1-38
CHAPITRE 2. MESURE DE LA TEMPÉRATURE	I.2-1
2.1 Généralités	I.2-1
2.2 Thermomètres à liquide sous verre	I.2-4
2.3 Thermographes mécaniques	I.2-10
2.4 Thermomètres électriques	I.2-11
2.5 Abris de protection contre le rayonnement	I.2-15
Annexe. Définition des points fixes de l'échelle internationale de température de 1990	I.2-18
Références et autres lectures	I.2-20
CHAPITRE 3. MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE	I.3-1
3.1 Généralités	I.3-1
3.2 Baromètres à mercure	I.3-3
3.3 Baromètres électroniques	I.3-8
3.4 Baromètres anéroïdes	I.3-11
3.5 Barographes	I.3-12
3.6 Baromètres de Bourdon	I.3-13
3.7 Variation barométrique	I.3-14
3.8 Conditions générales d'exposition	I.3-14
3.9 Exposition des baromètres	I.3-15
3.10 Comparaison, étalonnage et entretien	I.3-16
3.11 Réduction de la pression mesurée à des niveaux différents	I.3-21
3.12 Tendance de la pression et caractéristique de la tendance de la pression	I.3-22
Annexe 3.A. Correction des lectures du baromètre aux conditions normales	I.3-23
Annexe 3.B. Baromètres étalons régionaux	I.3-26
Références et autres lectures	I.3-27
CHAPITRE 4. MESURE DE L'HUMIDITÉ	I.4-1
4.1 Généralités	I.4-1
4.2 Psychromètre	I.4-6
4.3 Hygromètre à cheveux	I.4-12
4.4 Hygromètre à point de rosée à miroir	I.4-15

	<i>Page</i>
4.5 Hygromètre à condensation au chlorure de lithium (cellule à point de rosée)	I.4-18
4.6 Hygromètres à résistance ou capacité électrique	I.4-21
4.7 Hygromètres à absorption du rayonnement électromagnétique	I.4-21
4.8 Sécurité	I.4-22
4.9 Instruments étalons et étalonnage	I.4-24
Annexe 4.A. Définitions et spécifications de la vapeur d'eau dans l'atmosphère	I.4-27
Annexe 4.B. Formules à utiliser pour le calcul de l'humidité	I.4-30
Références et autres lectures	I.4-32
 CHAPITRE 5. MESURE DU VENT EN SURFACE	I.5-1
5.1 Généralités	I.5-1
5.2 Estimation du vent	I.5-4
5.3 Méthodes instrumentales simples	I.5-5
5.4 Anémomètres à coupelles et à pales	I.5-5
5.5 Girouettes	I.5-6
5.6 Autres dispositifs	I.5-7
5.7 Capteurs et combinaison de capteurs pour la mesure des composantes	I.5-7
5.8 Méthodes de traitement des données	I.5-7
5.9 Exposition des instruments anémométriques	I.5-10
5.10 Étalonnage et entretien	I.5-13
Annexe. Longueur de rugosité efficace	I.5-14
Références et autres lectures	I.5-15
 CHAPITRE 6. MESURE DES PRÉCIPITATIONS	I.6-1
6.1 Généralités	I.6-1
6.2 Emplacement et exposition	I.6-3
6.3 Pluviomètres non enregistreurs	I.6-4
6.4 Erreurs et corrections s'appliquant aux pluviomètres	I.6-6
6.5 Pluviomètres enregistreurs	I.6-9
6.6 Mesure de la rosée, du dépôt de glace et des précipitations de brouillard	I.6-12
6.7 Mesure des chutes de neige et du manteau neigeux	I.6-15
Annexe 6.A. Sites de comparaison de mesures des précipitations	I.6-19
Annexe 6.B. Procédures de correction suggérées pour les mesures des précipitations	I.6-20
Annexe 6.C. Procédure normalisée pour l'étalonnage en laboratoire des pluviomètres enregistreurs d'intensité de type récepteur	I.6-21
Références et autres lectures	I.6-23
 CHAPITRE 7. MESURE DU RAYONNEMENT	I.7-1
7.1 Généralités	I.7-1
7.2 Mesure du rayonnement solaire direct	I.7-5
7.3 Mesure du rayonnement global et diffus	I.7-11
7.4 Mesure du rayonnement total et du rayonnement de grandes longueurs d'onde	I.7-20
7.5 Mesure des grandeurs spéciales du rayonnement	I.7-25
7.6 Mesure du rayonnement ultraviolet	I.7-27
Annexe 7.A. Nomenclature des grandeurs énergétiques et lumineuses	I.7-32
Annexe 7.B. Grandeurs, symboles et définitions pour les mesures de rayonnement en météorologie	I.7-34
Annexe 7.C. Spécifications pour les Centres radiométriques régionaux nationaux et mondiaux	I.7-36
Annexe 7.D. Formules utiles	I.7-39
Annexe 7.E. Rayonnement solaire diffus - correction pour un arceau d'ombrage	I.7-41
Références et autres lectures	I.7-42

TABLE DES MATIÈRES

I.3

	<i>Page</i>
CHAPITRE 8. MESURE DE LA DURÉE D'INSOLATION	I.8-1
8.1 Généralités	I.8-1
8.2 Instruments et capteurs	I.8-3
8.3 Expositions des héliographes	I.8-7
8.4 Sources générales d'erreur	I.8-7
8.5 Étalonnage	I.8-8
8.6 Entretien	I.8-10
Annexe. Algorithme permettant de déterminer la durée d'insolation à partir de mesures de l'éclairement énergétique global direct	I.8-11
Références et autres lectures	I.8-12
CHAPITRE 9. MESURE DE LA VISIBILITÉ	I.9-1
9.1 Généralités	I.9-1
9.2 Estimation visuelle de la portée optique météorologique	I.9-5
9.3 Mesure instrumentale de la POM	I.9-9
Références et autres lectures	I.9-15
CHAPITRE 10. MESURE DE L'ÉVAPORATION	I.10-1
10.1 Généralités	I.10-1
10.2 Atmomètres	I.10-2
10.3 Bacs et bassins d'évaporation	I.10-3
10.4 Évapotranspiromètres (lysimètres)	I.10-6
10.5 Estimation de l'évaporation à partir de surfaces naturelles	I.10-8
Références et autres lectures	I.10-10
CHAPITRE 11. MESURE DE L'HUMIDITÉ DU SOL	I.11-1
11.1 Généralités	I.11-1
11.2 Mesure gravimétrique directe de la teneur en eau du sol	I.11-4
11.3 Mesure indirecte de la teneur en eau du sol	I.11-4
11.4 Instruments de mesure du potentiel hydrique du sol	I.11-7
11.5 Télédétection de l'humidité du sol	I.11-9
11.6 Choix de l'emplacement et de la taille de l'échantillon	I.11-10
Références et autres lectures	I.11-11
CHAPITRE 12. MESURE DE LA PRESSION, DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'HUMIDITÉ EN ALTITUDE	I.12-1
12.1 Généralités	I.12-1
12.2 Électronique embarquée	I.12-6
12.3 Capteurs de température	I.12-7
12.4 Capteurs de pression	I.12-9
12.5 Capteurs d'humidité relative	I.12-12
12.6 Équipement des stations terrestres	I.12-15
12.7 Opérations de radiosondage	I.12-16
12.8 Erreurs propres aux radiosondes	I.12-18
12.9 Comparaison, étalonnage et maintenance	I.12-29
12.10 Calcul et transmission des observations	I.12-32
Annexe 12.A. Exigences relatives à l'exactitude (erreur type) des mesures en altitude destinées à la météorologie synoptique, interprétées pour les mesures conventionnelles en altitude et du vent	I.12-35
Annexe 12.B. Seuils de performance concernant le vent en altitude et la température, l'humidité relative et l'altitude géopotentielle déterminées à l'aide d'une radiosonde	I.12-36
Annexe 12.C. Directives sur les comparaisons de radiosondes et l'établissement d'emplacements d'essai	I.12-41
Références et autres lectures	I.12-45

	<i>Page</i>
CHAPITRE 13. MESURE DU VENT EN ALTITUDE	I.13-1
13.1 Informations générales	I.13-1
13.2 Capteurs et instruments de mesure du vent en altitude	I.13-4
13.3 Méthodes de mesure	I.13-10
13.4 Exposition des appareils au sol	I.13-12
13.5 Sources d'erreurs	I.13-13
13.6 Comparaison, étalonnage et entretien	I.13-17
13.7 Corrections	I.13-19
Références et autres lectures	I.13-20
CHAPITRE 14. OBSERVATION DU TEMPS PRÉSENT ET PASSÉ ET DE L'ÉTAT DU SOL	I.14-1
14.1 Généralités	I.14-1
14.2 Observation du temps présent et passé	I.14-2
14.3 Observation de l'état du sol	I.14-7
14.4 Observation de phénomènes particuliers	I.14-8
Annexe. Critères d'intensité des précipitations faibles, modérées et fortes	I.14-9
Références et autres lectures	I.14-10
CHAPITRE 15. OBSERVATION DES NUAGES	I.15-1
15.1 Généralités	I.15-1
15.2 Estimation et observation de la nébulosité, de la hauteur de la base des nuages et du type de nuage par un observateur humain	I.15-3
15.3 Mesure de la nébulosité au moyen d'instruments	I.15-5
15.4 Mesure de la hauteur de la base des nuages au moyen d'instruments	I.15-6
15.5 Mesure du type des nuages au moyen d'instruments	I.15-11
15.6 Autres propriétés liées aux nuages	I.15-11
Références et autres lectures	I.15-12
CHAPITRE 16. MESURE DE L'OZONE	I.16-1
16.1 Généralités	I.16-1
16.2 Mesures de l'ozone en surface	I.16-3
16.3 Mesures de l'ozone total	I.16-4
16.4 Mesures du profil vertical de l'ozone	I.16-11
16.5 Corrections des mesures de l'ozone	I.16-16
16.6 Observations au moyen d'instruments embarqués à bord d'avions et de satellites	I.16-17
Annexe 16.A. Unités de mesure de l'ozone total et local	I.16-18
Annexe 16.B. Théorie de la mesure	I.16-20
Références et autres lectures	I.16-22
CHAPITRE 17. MESURE DE LA COMPOSITION DE L'ATMOSPHÈRE	I.17-1
17.1 Généralités	I.17-1
17.2 Mesure des variables spécifiques	I.17-1
17.3 Assurance de la qualité	I.17-10
Références et autres lectures	I.17-13

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS

1.1 **OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES**

1.1.1 **Généralités**

On effectue des observations météorologiques (environnementales et géophysiques connexes) à de multiples fins. Elles sont utilisées pour l'établissement d'analyses et de prévisions météorologiques en temps réel, pour les prévisions et les alertes d'événements météorologiques exceptionnels, pour l'étude du climat, pour la gestion locale dépendant du temps qu'il fait (par exemple : exploitation d'un aérodrome, construction d'ouvrages sur la terre ferme et en mer), en hydrologie et en météorologie agricole, et pour les recherches en météorologie et climatologie. Le but du *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* est d'indiquer la bonne façon de procéder aux mesures et observations nécessaires pour appuyer ces activités.

Il existe bien d'autres sources d'information en la matière, et le lecteur est invité à se reporter aux références fournies à la fin de chaque chapitre pour trouver une bibliographie relative aux principes et à l'emploi des instruments et des méthodes d'observation. Cette bibliographie comporte aussi des références aux pratiques nationales, aux normes nationales et internationales et à la littérature générale. Elle comporte également les rapports publiés par l'Organisation météorologique mondiale au nom de la Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) sur des conférences techniques, des instruments et des comparaisons d'instruments. De nombreux autres manuels et guides de l'OMM traitent d'applications particulières des observations météorologiques; il est en particulier conseillé de lire ceux relatifs au Système mondial d'observation (OMM, 2003a ; 1989), à la météorologie aéronautique (OMM, 1990), à l'hydrologie (OMM, 1994), à la météorologie agricole (OMM, 1994) et à la climatologie (OMM, 1983).

L'assurance de qualité et la maintenance sont particulièrement importants pour les mesures instrumentales. Tout au long de ce Guide de nombreuses recommandations seront faites afin d'atteindre les exigences de performance spécifiées. Tout particulièrement, la troisième partie de ce Guide est consacrée à l'assurance de qualité et à la gestion des systèmes

d'observation. Il est communément admis que la gestion de la qualité et que la formation à la qualité des spécialistes des instruments sont de la plus haute importance. C'est pourquoi, suite à la recommandation de la CIMO¹, plusieurs Associations régionales de l'OMM ont créé des Centres régionaux d'instruments (CRI) chargés d'entretenir les étalons et de prodiguer des conseils relatifs aux instruments météorologiques. L'énoncé de leurs attributions et leur adresse figurent dans l'Annexe 1.A. De plus, sur la recommandation de la CMOM² (OMM, 2009) un réseau de Centres régionaux d'instruments maritimes (CRIM) a été créé pour fournir des services analogues en ce qui concerne la météorologie maritime et d'autres mesures océanographiques connexes. L'énoncé de leurs attributions et leur adresse figurent dans la Partie II, Chapitre 4, Annexe 4.

Les définitions et les normes citées dans ce Guide (Voir section 1.5.1) se conformeront toujours aux normes adoptées internationalement. Les documents de base auxquels on doit se référer sont le Vocabulaire météorologique international (OMM, 1992a) et le Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie (ISO, 1993a).

1.1.2 **Représentativité**

La représentativité d'une observation est le niveau auquel est précisément décrite la valeur d'une variable nécessaire pour un besoin spécifique. Il n'y a donc pas de qualité uniformément fixée pour toutes les observations, mais elle résulte de l'appréciation conjointe de l'instrumentation, du pas de temps de mesure et de l'exposition en fonction des besoins d'une application particulière. Par exemple, les observations synoptiques doivent en règle générale être représentatives d'une aire de 100 km de rayon autour de la station, mais pour des applications à petite échelle ou locales, ce rayon peut être ramené à 10 km voire moins.

Chaque application a ses propres échelles de temps et d'espace, pour faire des moyennes, pour la densité des stations et la résolution des phénomènes – petites pour la météorologie agricole, grandes pour les prévisions globales à long terme. Les échelles de prévision sont intimement liées aux échelles

¹ Recommandé par la CIMO lors de sa neuvième session (1985) dans sa recommandation 19.

² Recommandé par la Commission technique mixte OMM/COI d'océanographie et de météorologie maritime (CMOM) lors de sa troisième session (2009) dans sa recommandation I (CMOM-III).

de temps des phénomènes et c'est ainsi que les prévisions météorologiques à court terme demandent des observations plus fréquentes sur un réseau plus dense dans un espace restreint pour pouvoir détecter n'importe quel phénomène de petite échelle et son développement rapide. Selon diverses sources (OMM, 2001, 2003a ; Orlanski, 1975), les échelles météorologiques horizontales peuvent être classées comme suit, avec un facteur d'incertitude égal à deux :

- (a) Micro-échelle (inférieure à 100 m), pour la météorologie agricole, par exemple, évaporation ;
- (b) Petite échelle ou échelle locale (entre 100 m et 3 km), par exemple: pollution de l'air, tornades;
- (c) Echelle moyenne ou méso-échelle (entre 3 et 100 km), par exemple: orages, brises de mer ou de montagne;
- (d) Grande échelle (entre 100 et 3 000 km), par exemple: fronts, cyclones, concentration de nuages;
- (e) Echelle planétaire (supérieure à 3 000 km), par exemple: ondes longues de la troposphère supérieure.

La section 1.6 recense les incertitudes requises et possibles des systèmes d'instruments. Les incertitudes déclarées possibles ne le sont qu'avec de bons instruments utilisés convenablement, mais on ne les obtient pas toujours dans la pratique. La bonne exécution des observations exige un savoir-faire, une formation, un équipement et un appui qui font parfois en partie défaut. L'intervalle de temps requis entre les mesures dépend de l'application : minutes pour l'aviation, heures pour l'agriculture, et jours pour la description du climat. L'organisation du stockage des données est un compromis entre la capacité de stockage disponible et les besoins de l'usager.

Une bonne exposition, qui est représentative à des échelles allant de quelques mètres à cent kilomètres est difficile à assurer (Voir section 1.3). Les erreurs résultant d'une exposition non représentative peuvent être beaucoup plus importantes que celles du système instrumental pris isolément. Une station implantée sur un terrain accidenté ou près d'un rive ne sera probablement pas représentative à grande et moyenne échelle. Les données d'une station non représentative peuvent néanmoins rester utilisables à des fins climatologiques si elles demeurent homogènes dans le temps.

L'annexe 1.B traite plus avant la question de la représentativité d'une station et fournit des directives concernant la classification des stations d'observation terrestres afin d'apprécier leur représentativité pour la mesure de différentes variables.

1.1.3

Métadonnées

Le but de ce Guide et des publications de l'OMM qui s'y rapportent est d'assurer la fiabilité des observations grâce à la normalisation. Les ressources et circonstances locales peuvent toutefois faire que les normes adoptées concernant les instruments et l'exposition ne soient parfaitement respectées. Un exemple caractéristique est celui des régions recevant d'abondantes chutes de neige, où les instruments sont placé plus haut qu'à l'habitude pour qu'ils puissent être utilisables aussi bien en hiver qu'en été.

Les utilisateurs des observations météorologiques ont souvent besoin de connaître l'exposition, le type et l'état des instruments ainsi que la façon dont ils sont exploités, et peut-être le détail des observations. Cela est aujourd'hui particulièrement important pour les études climatiques, pour lesquelles on doit examiner précisément l'histoire des stations. Les métadonnées (données sur les données) concernant toutes les informations sur l'établissement et la maintenance de la station énumérées dans la section 1.3, de même que toutes les modifications ayant pu advenir, y compris l'histoire de l'étalonnage et de la maintenance et les modifications d'exposition et de personnel doivent être conservées (OMM, 2003b). Les métadonnées sont particulièrement importantes pour les aspects très sensibles à l'exposition tels que les précipitations, le vent et la température. Une forme élémentaire de métadonnée est l'information sur l'existence, la disponibilité et la qualité des données météorologiques et des métadonnées les concernant.

1.2

SYSTÈMES D'OBSERVATION MÉTÉOROLOGIQUES

La demande en données d'observation peut être satisfaite au moyen de mesures in situ et par télé-détection (y compris à partir de l'espace) selon la capacité des différents systèmes de capteurs à mesurer l'élément considéré. OMM (2003a) subdivise les besoins en mondiaux, régionaux et nationaux et d'après les domaines applications. Le Système mondial d'observation conçu afin d'y répondre se compose d'un sous-système de surface et d'un sous-système spatial. Le sous-système de surface comprend un large éventail de stations dont le type varie en fonction des applications (station synoptique de surface, station aérologique, station climatologique etc.). Le sous-système spatial comprend un certain nombre d'engins spatiaux dotés d'équipements de sondage et le segment au sol apparié de commande, contrôle et réception des données. Les chapitres

du Guide traitent du sous-système de surface et, plus succinctement, du sous-système spatial. Pour atteindre certaines observations météorologiques grâce à des systèmes automatiques, par exemple le temps présent, on doit faire appel à une approche appelée « multicapteur », où le résultat est obtenu par un algorithme appliqué aux sorties de différents capteurs.

1.3 PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES POUR UNE STATION MÉTÉOROLOGIQUE

Le Manuel du SMO (OMM, 2003a) contient la liste détaillée des éléments à observer selon le type de la station et le réseau d'observation. Les besoins en données d'observation auxquels doivent répondre une station climatologique classique ou une station du réseau synoptique en surface sont examinés dans la présente section.

Une station d'observation en surface observe les éléments suivants, (les chapitres indiqués sont ceux de la Partie I) :

Temps présent	(chapitre 14)
Temps passé	(chapitre 14)
Vitesse et direction du vent	(chapitre 5)
Nébulosité	(chapitre 15)
Type des nuages	(chapitre 15)
Hauteur de la base des nuages	(chapitre 15)
Visibilité	(chapitre 9)
Température	(chapitre 2)
Humidité relative	(chapitre 4)
Pression atmosphérique	(chapitre 3)
Précipitations	(chapitre 6)
Enneigement	(chapitre 6)
Insolation et/ ou rayonnement solaire	(chapitre 7 et 8)
Température du sol	(chapitre 2)
Evaporation	(chapitre 10)

Il existe des instruments pour la mesure de tous ces éléments, à l'exception du type des nuages, mais en l'état actuel de la technique ils ne permettent pas d'observer le temps présent et passé, la nébulosité, la hauteur des nuages et l'enneigement aussi complètement que le fait un observateur humain.

Certaines stations météorologiques effectuent des mesures en altitude (Chapitres 12 et 13 de la Partie I), des mesures de l'humidité du sol (chapitre 11 de la Partie I), des mesures de l'ozone (chapitre 16 de la Partie I) et de la composition de l'atmosphère (chapitre 17 de la Partie I), et utilisent des instruments spéciaux décrits dans la Partie II du Guide.

Des renseignements détaillés sur les méthodes d'observation et l'emploi des instruments figurent dans les chapitres de ce Guide.

1.3.1 Stations météorologiques automatiques

La plupart des éléments qu'il faut observer à des fins synoptiques, climatologiques ou aéronautiques peuvent se mesurer à l'aide de systèmes automatiques (chapitre 1, Partie II).

A mesure que les capacités des systèmes automatiques augmentent, la part des stations météorologiques entièrement automatiques s'accroît régulièrement par rapport à celle des stations desservies par des observateurs humains (utilisant ou non des instruments automatiques). Les directives ci-après concernant l'implantation et l'exposition des stations, les modifications intervenant dans leur dotations en instruments, les inspections et la maintenance valent pour les unes et les autres.

1.3.2 Observateurs

Des observateurs météorologiques sont nécessaires pour l'accomplissement des tâches ci-après:

- a) Exécuter avec les instruments appropriés des observations synoptiques et/ou climatologiques offrant l'exactitude requise;
- b) Maintenir en bon état les instruments, les informations concernant les métadonnées et les sites d'observation;
- c) Coder et envoyer les observations (en l'absence de systèmes automatiques de chiffrement et de communications);
- d) Entretenir les appareils enregistreurs de la station, notamment changer les diagrammes s'il y a lieu;
- e) Dresser ou collationner les relevés hebdomadaires et/ou mensuels de données climatologiques en l'absence de systèmes automatiques appropriés;
- f) Fournir des observations supplémentaires ou de sauvegarde lorsque l'équipement automatique se trouve hors de service ou ne se prête pas à l'observation de tous les éléments prescrits.
- g) Répondre aux demandes du public et des professionnels.

Les observateurs devraient recevoir d'un Service météorologique habilité une formation et/ou un diplôme garantissant qu'ils possèdent les compétences voulues pour faire des observations conformes aux normes en vigueur. Ils devraient être capables d'interpréter et d'adapter à leurs systèmes d'observation particuliers les instructions intéressant l'emploi des instruments et des techniques manuelles. Le

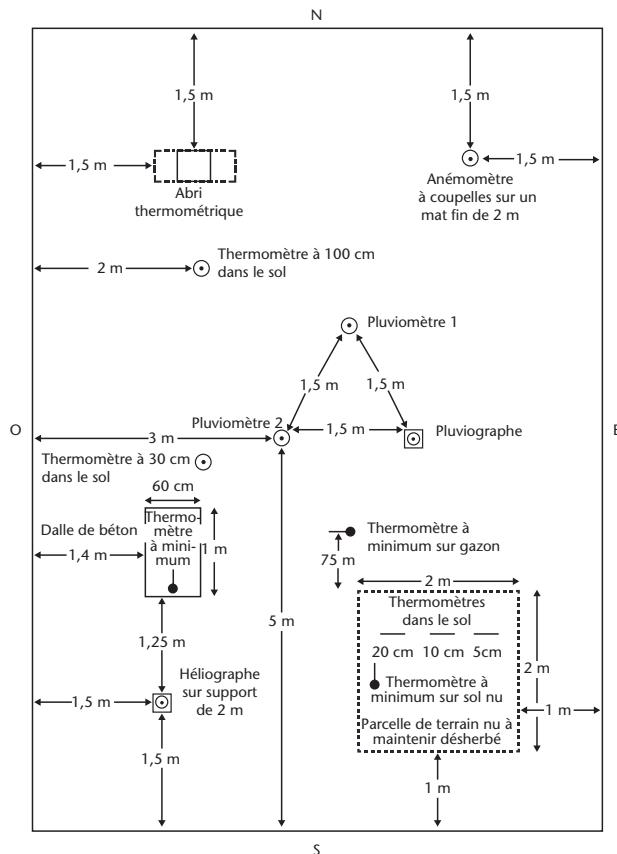


Figure 1.1. Schéma d'une station d'observation située dans l'hémisphère Nord, sur lequel sont indiquées les distances minimales à respecter entre les installations

chapitre 5 de la Partie III contient des directives sur la formation des observateurs dans le domaine des instruments.

1.3.3 **Implantation et exposition des équipements**

1.3.3.1 **Choix du site**

Les stations d'observation météorologiques sont destinées à effectuer des mesures (ou observations) représentatives dont la nature dépend du type de la station. Les observations d'une station du réseau synoptique devraient ainsi répondre aux besoins d'ordre synoptique, tandis que celles d'une station météorologique aéronautique devraient décrire les conditions particulières régnant dans son voisinage (l'aérodrome). Lorsqu'une station sert à plusieurs fins, aéronautiques, synoptiques et climatologiques par exemple, c'est le besoin le plus contraignant qui dicte le choix précis du site d'observation et de l'emplacement des capteurs. On trouvera dans OMM (1993a) une étude détaillée concernant l'implantation et l'exposition des stations.

Les consignes ci-après s'appliquent par exemple à l'exposition des instruments et à l'implantation d'une station synoptique ou climatologique classique appartenant à un réseau régional ou national.

- Les instruments extérieurs devraient être installés sur un terrain plat d'au moins 25 mètres sur 25 lorsqu'il y a de nombreux instruments, mais lorsqu'il y a relativement peu d'instruments (comme sur la Figure 1.1) la surface peut être beaucoup plus faible, par exemple 10 mètres sur 7 (d'enclos). Le sol devrait être couvert d'herbe courte ou dont la surface soit analogue à celle du sol environnant, protégé des visiteurs non autorisés par une clôture ou une palissade à claire-voie. A l'intérieur de l'enclos, un carré d'environ deux mètres sur deux sera conservé nu pour les observations de l'état et de la température du sol à des profondeurs inférieures à 30 centimètres (Chapitre 2 de la Partie I) (La température du sol aux profondeurs supérieures à 20 cm peuvent être mesurées à l'extérieur de cet espace de terrain nu) On trouvera sur la Figure 1.1 (empruntée à OMM, 1989) un exemple de plan d'une telle station.

- b) Il ne devrait pas exister de pentes raides à proximité du site et celui-ci ne devrait pas être au fond d'une cuvette. Si ces conditions ne sont pas remplies, les observations risquent de présenter des singularités purement locales.
- c) Le site devrait être très éloigné d'arbres, immeubles, murs ou autres obstacles. Il devrait y avoir entre un obstacle de ce genre (y compris la clôture) et le pluviomètre une distance égale à au moins deux fois, et de préférence quatre fois, la hauteur de l'obstacle au-dessus de l'ouverture du pluviomètre.
- d) Les héliographes, pluviomètres et anémomètres doivent être installés dans le même site que les autres instruments, à des endroits où ils jouiront d'une exposition conforme à leurs exigences particulières.
- e) Il convient de noter que l'enclos n'est pas toujours l'endroit le plus favorable à l'estimation de la vitesse et de la direction du vent; il peut être souhaitable de retenir un autre point d'observation mieux exposé au vent.
- f) Les sites très dégagés, satisfaisants pour la plupart des instruments, ne le sont pas pour les pluviomètres; sauf s'il est léger, le vent y réduit la quantité de pluie captée et il faut alors aménager un abri.
- g) Si on trouve dans l'enclos à proximité des instruments des obstacles tels qu'arbres ou immeubles et que l'on ne dispose pas d'une vue suffisamment étendue sur le paysage environnant, on devrait choisir un autre endroit pour l'observation de l'ensoleillement ou du rayonnement.
- h) L'endroit d'où l'on observe les nuages et la visibilité devrait être le plus dégagé et offrir la plus large vue possible sur le ciel et le paysage environnant.
- i) Les stations côtières devraient être installées à un endroit d'où l'on voit bien la haute mer, mais pas trop près du bord d'une falaise parce que les tourbillons engendrés par celle-ci affecteraient les mesures de la quantité de précipitations et du vent.
- j) Il vaut mieux observer les nuages et la visibilité d'un endroit où l'observation n'est pas perturbée par des lumières parasites.

Il est évident que certaines des conditions ci-dessus peuvent être contradictoires et imposer des solu-

tions de compromis. On trouvera dans les chapitres suivants des informations détaillées concernant les différents instruments et mesures.

1.3.3.2 Coordonnées de la station

La position d'une station repérée dans le Système géodésique mondial 1984 (WGS-84) Modèle gravimétrique de la Terre 1996 (EGM96) doit être connue et enregistrée exactement³. Ces coordonnées sont :

- a) la latitude en degrés avec une résolution de 1 pour 1000 ;
- b) la longitude en degrés avec une résolution de 1 pour 1000 ;
- c) l'altitude de la station au-dessus du niveau moyen de la mer⁴ arrondie au mètre le plus proche.

Ces coordonnées se rapportent à la parcelle de terrain où ont lieu les observations et diffèrent donc parfois de celles de la ville, du village ou de l'aérodrome dont la station porte le nom.

L'altitude de la station est définie comme la distance verticale entre le niveau moyen de la mer et la surface du sol sous le pluviomètre ou, s'il n'y a pas de pluviomètre, sous l'abri météorologique. S'il n'existe ni pluviomètre ni abri, c'est la distance verticale entre le niveau moyen de la mer et le niveau moyen du terrain au voisinage de la station. Si la station mesure la pression, l'altitude à laquelle celle-ci est mesurée doit être précisée à part. C'est l'altitude à laquelle se réfèrent les relevés barométriques de la station; de telles valeurs barométriques sont appelées «pression à la station» et considérées comme se référant au niveau donné en vue de maintenir la continuité des observations barométriques (OMM, 1993b).

Si une station située sur un aéroport, les autres altitudes doivent être précisées (voir Partie II, chapitre 2 et OMM, 1990). Les définitions des mesures de la hauteur et du niveau moyen de la mer figurent dans la publication OMM (1992a).

1.3.4 Changements d'instruments et homogénéité

Les caractéristiques d'un site d'observation se modifient généralement au fil du temps, en raison par exemple de la croissance des arbres ou de la construction de bâtiments sur des terrains adjacents. Il faudrait choisir les sites de façon à réduire autant que possible ce genre d'effets. Une documentation sur la géographie et l'exposition du site doit être conservée et régulièrement mise à jour dans les métadonnées (Voir Annexe 1.C et OMM, 2003b).

Il est particulièrement important de minimiser les effets des renouvellements d'instruments et/ou du déplacement de certains d'entre eux. La mise en

³ Pour une explication du système WGS-84 et les questions d'enregistrement, voir OACI (2002).

⁴ Le niveau moyen de la mer (NMM) est défini dans OMM, 1992a. Le niveau de référence convenu doit être un géoïde bien défini comme le Modèle gravimétrique de la Terre (EGM96) lié au Système géodésique mondial 1984 (WGS-84) [Géoïde : Surface équipotentielle de la gravité terrestre qui s'ajuste au mieux, au sens des moindres carrés, au NMM global].

service de nouveaux instruments, même si l'on en connaît bien les caractéristiques statiques, risque de produire des changements apparents dans la climatologie du site. Pour s'en prémunir, il faudrait comparer durant une longue période (un an au moins) les observations exécutées avec les nouveaux instruments à celles provenant de l'ancien système de mesure avant d'abandonner ce dernier. Ceci s'applique également aux changements d'emplacement. A défaut de pouvoir agir ainsi partout, il est capital d'effectuer des comparaisons dans un choix d'endroits représentatifs en vue de déceler les modifications trompeuses que l'emploi d'une technique nouvelle ou le déplacement forcé d'instruments pourraient faire subir aux données mesurées.

1.3.5 **Inspection et maintenance**

1.3.5.1 **Inspection des stations**

Toutes les stations synoptiques terrestres et stations climatologiques principales devraient être inspectées au moins une fois tous les deux ans. Les stations de météorologie agricole et stations spéciales devraient l'être à des intervalles suffisamment rapprochés pour garantir la qualité des observations et le bon fonctionnement des instruments.

Les inspections visent essentiellement à s'assurer que :

- a) L'emplacement et l'exposition des instruments sont connus, satisfaisants et; suffisamment documentés ;
- b) Les instruments sont d'un modèle approuvé, en bon état et s'il y a lieu vérifiés régulièrement par comparaison avec des étalons ;
- c) Les méthodes d'observation et les méthodes de calcul des grandeurs dérivées sont uniformes ;
- d) Les observateurs ont la compétence voulue pour s'acquitter de leurs tâches ;
- e) Les métadonnées sont à jour.

D'autres renseignements sur la normalisation des instruments figurent dans la section 1.5.

1.3.5.2 **Maintenance**

Les postes d'observation et les instruments devraient être entretenus régulièrement de manière que la qualité des observations ne se détériore pas sensiblement entre deux inspections de la station. Le programme d'entretien ordinaire (préventif) comprend le «ménage» périodique des sites et du matériel (par exemple, fauchage de l'herbe et nettoyage des parties non protégées des instruments) et les vérifications auxquelles les fabricants recommandent de soumettre les instruments automatiques. Il faudrait prévoir de fréquents contrôles de qualité à la station ou dans un centre approprié afin de déceler le plus tôt possi-

ble les défaillances de l'équipement. Selon la nature de la défaillance et le type de la station, l'équipement devrait être remplacé ou réparé conformément à un ordre de priorité et dans des délais convenus. Il importe tout particulièrement de tenir un journal des dysfonctionnements et des dispositions prises pour y remédier lorsque les données servent à des fins climatologiques et d'archiver ces informations au titre des métadonnées.

D'autres renseignements sur l'inspection et la gestion des stations figurent dans la publication OMM (1989).

1.4 **EXIGENCES GÉNÉRALES EN MATIÈRE D'INSTRUMENTS**

1.4.1 **Caractéristiques souhaitables**

Les qualités primordiales d'un instrument météorologique sont :

- a) L'exactitude, en fonction de celle prescrite pour la variable mesurée ;
- b) La fiabilité et la stabilité ;
- c) La commodité d'emploi, d'étalonnage et d'entretien ;
- d) La simplicité, tant qu'elle est compatible avec les autres exigences ;
- e) La durabilité ;
- f) Le coût raisonnable de l'instrument, des consommables et des pièces détachées.

S'agissant des deux premières qualités, il est important qu'un instrument reste d'une exactitude reconnue pendant une longue durée plutôt que d'offrir, au début, une exactitude élevée qui ne peut être maintenue durablement dans les conditions d'exploitation.

L'étalonnage préliminaire des instruments révèle en général des écarts par rapport au résultat idéal qui imposent d'apporter des corrections aux données observées durant les opérations normales. Il importe de conserver les données d'étalonnage avec les instruments au poste d'observation et d'indiquer clairement aux observateurs la façon de les utiliser.

La simplicité, la robustesse et la commodité d'emploi et d'entretien revêtent une grande importance puisque la plupart des instruments météorologiques fonctionnent en permanence toute l'année en des lieux parfois très éloignés d'un bon atelier de réparation. La robustesse est particulièrement souhaitable pour les équipements entièrement ou partiellement exposés aux intempéries. Le respect de ces caractéristiques réduira souvent le montant global des dépen-

ses, supérieur à l'investissement initial, qu'implique la fourniture de bonnes observations.

1.4.2 Instruments enregistreurs

Bon nombre des instruments enregistreurs employés en météorologie sont du type dans lequel le mouvement de l'élément capteur est amplifié par des leviers qui déplacent une plume sur un diagramme fixé à un tambour mû par un mouvement d'horlogerie. Il faudrait limiter autant que possible les frottements non seulement entre les coussinets, mais aussi entre la plume et le papier. Ils devraient comporter un dispositif qui permette de régler la pression de la plume sur le papier sans aller toutefois jusqu'à l'alléger au point d'empêcher l'obtention d'un tracé lisible continu. Les enregistreurs à mouvement d'horlogerie devraient être également munis d'un dispositif de marquage chronométrique. Les instruments enregistreurs destinés à être utilisés dans les climats froids doivent être conçus avec un soin particulier afin que les basses températures et les conditions d'humidité extrêmes n'entraînent pas leur fonctionnement et qu'un observateur ganté puisse effectuer les opérations ordinaires (marquage de l'heure etc.).

Il faudrait comparer fréquemment les instruments enregistreurs avec des instruments à lecture directe.

Un nombre croissant d'instruments sont dotés d'un système d'enregistrement électronique sur bande magnétique ou microcircuits à semi-conducteurs. La majeure partie des recommandations formulées ci-dessus au sujet des coussinets, des frottements et du froid valent aussi pour leurs éléments mécaniques.

1.5 ÉTALONS ET DÉFINITIONS

1.5.1 Définitions d'étalons

Le terme «étau» et d'autres termes semblables désignent des instruments, méthodes et échelles utilisés pour établir l'exactitude des mesures. Une nomenclature des étaux de mesure est fournie dans le *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés*, rédigé conjointement par le Bureau international des poids et mesures, la Commission électrotechnique internationale, la Fédération internationale de chimie clinique, l'Organisation internationale de normalisation, l'Union internationale de chimie pure et appliquée, l'Union internationale de physique pure et appliquée et l'Organisation internationale de métrologie légale, et publié par l'ISO. La version la plus récente

est JCGM 200:2008, disponible en ligne à l'adresse : <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/vim.html>

Notons les définitions suivantes :

- **Étau** : réalisation de la définition d'une grandeur donnée, avec une valeur déterminée et une incertitude de mesure associée, utilisée comme référence.

Exemple 1 : Étau de masse de 1 kg avec une incertitude type associée de 3 µg.

Exemple 2 : Résistance étalonnée de 100 Ω avec une incertitude type associée de 1 µΩ.

- **Étau international** : étalonnage reconnu par les signataires d'un accord international pour une utilisation mondiale.

Exemple : Le prototype international du kilogramme.

- **Étau national** : étalonnage reconnu par une autorité nationale pour servir, dans un état ou une économie, comme base à l'attribution de valeurs à d'autres étaux de grandeurs de la même nature.

- **Étau primaire** : étalonnage établi à l'aide d'une procédure de mesure primaire ou créé comme objet choisi par convention.

Exemple 1 : Étau primaire de concentration en quantité de matière préparé en dissolvant une quantité de matière connue d'une substance chimique dans un volume connu de solution.

Exemple 2 : Étau primaire de pression fondé sur des mesurages séparés de force et d'aire.

- **Étau secondaire** : étalonnage établi par l'intermédiaire d'un étalonnage par rapport à un étalonnage primaire d'une grandeur de même nature.

- **Étau de référence** : étalonnage d'autres étaux de grandeurs de même nature dans une organisation donnée ou en un lieu donné.

- **Étau de travail** : étalonnage établi pour établir ou contrôler des instruments de mesure ou des systèmes de mesure.

• Un étalonnage de travail est habituellement étalonné par rapport à un étalonnage de référence.

• Un étalonnage de travail servant à la vérification est aussi désigné comme « étalonnage de vérification » ou « étalonnage de contrôle ».

- **Étau de transfert** : étalonnage utilisé comme intermédiaire pour comparer des étaux entre eux.

• Le terme « dispositif de transfert » doit être utilisé si l'intermédiaire n'est pas un étalonnage.

- **Dispositif de transfert** : dispositif utilisé comme intermédiaire pour comparer des étaux entre eux.

- Des étalons peuvent parfois servir de dispositifs de transfert.

- **Étalon voyageur** : étalon, parfois de construction spéciale, destiné au transport en des lieux différents.

- **Étalon collectif** : ensemble de mesures matérialisées ou d'appareils de mesure semblables associés pour remplir en commun le rôle d'étalon.

Exemple : La référence radiométrique mondiale.

- Un étalon collectif est habituellement destiné à fournir une valeur unique d'une grandeur.

- La valeur fournie par un étalon collectif est une moyenne appropriée des valeurs fournies par les divers instruments.

- **Traçabilité** : propriété d'un résultat de mesure ou de la valeur d'un étalon selon laquelle ce résultat peut être relié des références précises, généralement des étalons internationaux ou nationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons dont l'incertitude est précisée.

- **Traçabilité métrologique** : propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure.

- **Étalonnage** : opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication.

- Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicatrice de l'indication avec une incertitude de mesure associée.

- Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement « auto-étalonnage », ni avec la vérification de l'étalonnage.

1.5.2 Dispositif adopté pour la normalisation des instruments

L'OMM a adopté un dispositif d'étalons nationaux et régionaux afin d'assurer la normalisation des instruments météorologiques aux échelons national et international. Des renseignements sur l'endroit où se trouvent les étalons régionaux pour les mesures de la pression et du rayonnement solaire figurent

respectivement aux chapitres 3 (Annexe 3.B) et 7 (Annexe 7.C) de la Partie I. En règle générale, les étalons régionaux sont désignés par les associations régionales et les étalons nationaux par les Membres. Sauf prescriptions contraires, les uns et les autres devraient être comparés à des étalons voyageurs au moins une fois tous les cinq ans. Il n'est pas indispensable que les instruments utilisés comme étalons voyageurs soient aussi exacts que les étalons primaires ou secondaires, mais ils devraient néanmoins être suffisamment robustes pour que le transport ne les dérègle pas.

De même, les instruments employés en exploitation dans un Service devraient être comparés à intervalles réguliers, directement ou indirectement, aux étalons nationaux. Au sein du Service, il faudrait autant que possible effectuer les comparaisons d'abord à la livraison des instruments, puis lors de chaque inspection périodique de la station ainsi qu'il est recommandé à la section 1.3.5. Les instruments étalons portatifs utilisés par les inspecteurs devraient être vérifiés par comparaison avec les instruments étalons du Service avant et après chaque tournée d'inspection.

Il faudrait comparer entre eux les instruments opérationnels de conceptions différentes (ou dont le fonctionnement repose sur des principes différents) en vue de garantir l'homogénéité des mesures dans l'espace et dans le temps (voir la section 1.3.4).

1.5.3 Symboles, unités et constantes

1.5.3.1 Symboles et unités

Les instruments de mesure produisent des valeurs numériques. Le but de ces mesurages est d'obtenir des grandeurs physiques ou météorologiques représentant l'état local de l'atmosphère. Dans la pratique météorologique, les lectures des instruments représentent des variables telles que « pression atmosphérique », « température de l'air » ou « vitesse du vent ». Une variable dont le symbole est a est habituellement représentée sous la forme $a = \{a\} \cdot [a]$, où $\{a\}$ représente la valeur numérique et $[a]$ représente le symbole de l'unité. On trouvera les principes généraux relatifs aux quantités, aux unités et aux symboles dans ISO (1993) et UIPPA (1987). Il faudrait utiliser le Système international d'unités (SI) pour l'évaluation des éléments météorologiques inclus dans les messages destinés à l'échange international. Ce système est publié et mis à jour par le Bureau international des poids et mesures (BIPM, 2006). NIST (1995) et ISO (1993) ont publié des guides d'utilisation du système SI. On trouvera dans les Tables météorologiques internationales (OMM, 1966) et dans les chapitres pertinents de ce guide, les variables ne possédant pas

de symbole international dans le système international des grandeurs (SIG/ISQ) mais couramment utilisées en météorologie.

Les unités suivantes devraient être employées dans les observations météorologiques :

- (a) Pression atmosphérique, p , en hectopascals (hPa)⁵ ;
- (b) Température, t , en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou T en Kelvin (K) ;

Note : Les échelles de température Celsius et Kelvin doivent être conformes à la définition actuelle de l'échelle de température internationale (pour 2004 : ITS-90, voir BIPM, 1990)

- (c) Vitesse du vent en mètres par seconde (m s^{-1}) pour les observations tant en surface qu'en altitude ;
- (d) Direction du vent en degrés depuis le nord dans le sens des aiguilles d'une montre, ou selon l'échelle 0-36 dans laquelle 36 est le vent du nord et 09 le vent d'est ($^{\circ}$) ;
- (e) Humidité relative, U , en pourcentage (%) ;
- (f) Précipitations (hauteur totale) en millimètres (mm) ou en kilogrammes par mètre carré (kg m^{-2})⁶ ;
- (g) Intensité des précipitations, R_i , en millimètres par heure (mm h^{-1}) ou en kilogrammes par mètre carré et par seconde ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)⁷ ;
- (h) Équivalent en eau de la neige en kilogrammes par mètre carré (kg m^{-2}) ;
- (i) Évaporation en millimètres (mm) ;
- (j) Visibilité en mètres (m) ;
- (k) Éclairement énergétique en watts par mètre carré et exposition énergétique en joules par mètre carré ($\text{W m}^{-2}, \text{J m}^{-2}$) ;
- (l) Durée d'insolation en heures (h) ;
- (m) Hauteur des nuages en mètres (m) ;
- (n) Nébulosité en octas ;
- (o) Géopotentiel, utilisé dans les observations en altitude, en mètres géopotentiels standards (m^{\prime}) .

• *Note* : Hauteurs, niveaux et altitude sont exprimés par rapport à une référence bien définie. Les plus courantes sont le Niveau moyen de la mer (NMM), l'altitude de la station ou le plan 1013,2 hPa.

Le mètre géopotentiel étant par définition égal à 0,980 665 mètre dynamique, la valeur du géopoten-

⁵ Le « pascal » est l'unité SI de pression. L'unité et le symbole « bar » n'appartiennent pas au système SI ; à chaque fois qu'elle est utilisée cette unité (bar) doit être définie par rapport au système SI. La poursuite de son utilisation est déconseillée. Par définition, 1 mbar (millibar) \approx 1 hPa (hectopascal).

⁶ En supposant qu'un mm équivaut à 1 kg m^{-2} , indépendamment de la température.

⁷ Recommandation 3 (CBS-XII), Annexe 1, adoptée dans le cadre de la résolution 4 (CE-LIII).

tiel est, pour la mesure des niveaux dans la troposphère, numériquement proche de la hauteur exprimée en mètres.

1.5.3.2 Constantes

Les constantes ci-après ont été adoptées pour la météorologie :

- (a) Température absolue du point de glace normal $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ($t=0,00 ^{\circ}\text{C}$) ;
- (b) Température absolue du point triple de l'eau $T = 273,16 \text{ K}$ ($t=0,01 ^{\circ}\text{C}$), défini par ITS-90 ;
- (c) Valeur normale de l'accélération de la pesanteur (g_n) = $9,806\,65 \text{ m s}^{-2}$;
- (d) Masse volumique du mercure à $0^{\circ}\text{C} = 1,35951 \cdot 10^4 \text{ kg m}^{-3}$.

Les valeurs d'autres constantes figurent les documents OMM (1973) et OMM (1988).

1.6 INCERTITUDES DE MESURE

1.6.1 Mesures météorologiques

1.6.1.1 Généralités

La présente section porte sur les définitions relatives à l'évaluation de l'exactitude et à la détermination des incertitudes dans les mesures physiques, s'achève par un état des exactitudes requises et possibles en météorologie, mais commence par l'examen de quelques questions que soulèvent plus particulièrement les mesures météorologiques.

Le terme *mesurage* est méticuleusement défini dans la section 1.6.2, mais on utilise presque partout dans le *Guide* de façon moins stricte celui de mesure pour exprimer le processus de mesurage ou son résultat, soit ce qu'il est permis d'appeler aussi une observation. Un échantillon est une mesure isolée, appartenant ordinairement à une série de lectures ponctuelles ou instantanées d'un capteur dont on déduit une valeur moyenne ou lissée pour faire une observation. Les chapitres 2 et 3 de la Partie III traitent plus théoriquement des principes du mesurage.

Les termes *exactitude*, *erreur* et *incertitude* sont définis précisément dans la section 1.6.2, où l'on explique que l'exactitude est un terme qualitatif dont l'expression numérique est l'incertitude. C'est ce qu'il faudrait adopter et c'est ainsi que nous avons procédé dans ce Guide. Antérieurement on utilisait couramment le vocable exactitude de façon moins précise, par exemple à écrire «une exactitude de $\pm x$ » là où il faudrait dire «une incertitude de x ».

1.6.1.2 Origines et estimation des erreurs

Les erreurs susceptibles d'entacher les diverses mesures météorologiques sont étudiées cas par cas dans les chapitres suivants du Guide, mais on peut de manière générale considérer qu'elles s'accumulent au fil de la chaîne traçabilité et en fonction des conditions dans lesquelles les mesures s'opèrent.

Il est commode de prendre la température de l'air comme exemple de la façon dont les erreurs se produisent, mais les indications ci-après s'adaptent aisément aux mesures de la pression, du vent et d'autres grandeurs météorologiques. Les erreurs dans une mesure thermométrique proviennent :

- a) Des erreurs inhérentes aux étalons internationaux, nationaux et de travail et de celles commises dans leurs comparaisons; on peut les considérer comme négligeables pour les applications météorologiques ;
- b) Des erreurs inhérentes aux comparaisons entre les étalons de travail, voyageurs et/ou de contrôle et les instruments d'exploitation en laboratoire ou dans les bains (si c'est ainsi qu'on effectue les raccordements); ces erreurs sont faibles (incertitude voisine de $\pm 0,1 \text{ K}$ avec un niveau de confiance de 95 pour cent, y compris les erreurs mentionnées à l'alinéa a) ci-dessus) lorsque les comparaisons sont bien menées, mais s'amplifient rapidement en raison inverse de l'habileté de l'opérateur et de la qualité de l'équipement ;
- c) Des défauts du thermomètre d'exploitation et de son transducteur (selon le type de l'élément thermométrique) : non-linéarité, dérive, infidélité de l'instrument et mauvaise reproductibilité des mesures ;
- d) De l'efficacité du transfert thermique entre l'air de l'abri du thermomètre et ce dernier, qui devrait assurer que l'air et le thermomètre sont en équilibre thermique (en tenant compte d'une constante de temps du système ou d'un coefficient de retard). Dans un abri bien ventilé cette erreur sera très petite, mais peut devenir importante si ce n'est pas le cas ;
- e) De l'efficacité de l'abri, lequel devrait garantir que la température de l'air soit la même à son intérieur que dans son voisinage immédiat; cette erreur est faible dans un abri bien conçu, mais la différence entre les données recueillies respectivement dans un bon abri et un abri médiocre peut atteindre 3 °C ou plus en certains cas ;
- f) De l'exposition, qui devrait être telle que l'abri soit à une température représentative de la région étudiée; la proximité de sources et puits de chaleur (immeubles, surfaces atypiques sous et autour de l'abri) et la topographie (collines,

littoral) peuvent engendrer des erreurs importantes. Les métadonnées de la station doivent comporter une bonne description de l'exposition régulièrement mise à jour (Voir Annexe 1.C) pour informer les utilisateurs des données de possibles erreurs liées à l'exposition.

Des erreurs tant systématiques qu'aléatoires se produisent à tous les stades précités. Les effets des sources d'erreur d) à f) peuvent rester modestes si l'on procède avec beaucoup d'attention et si un site convenable est disponible. Autrement ces sources d'erreur peuvent contribuer dans une large mesure à une importante erreur globale. On les oublie pourtant parfois, comme si l'étalonnage des capteurs en laboratoire suffisait à définir complètement les erreurs.

Déterminer la valeur vraie n'est pas facile en météorologie (Linacre, 1992). Des comparaisons d'instruments bien organisées sur le terrain renseignent sur leur capacité à fournir une bonne estimation de l'incertitude découlant des facteurs a) à e) ci-dessus. Si l'exposition de la station est bien documentée, les effets d'une exposition imparfaite peuvent être corrigés systématiquement pour certaines grandeurs (Par exemple le vent ; voir OMM, 2002) et doivent être estimés pour les autres.

Un procédé efficace de contrôle de la qualité, s'il existe suffisamment de stations fiables dans la région considérée, consiste à comparer des données de terrain à des champs analysés numériquement avec le concours de stations voisines. Les différences entre les observations faites à la station et les valeurs interpolées à partir du champ analysé découlent à la fois des erreurs présentes dans le champ et du fonctionnement de la station. Toutefois, sur une certaine durée, on peut supposer que l'erreur moyenne à chaque point du champ analysé est de zéro si les stations avoisinantes sont adéquates aux fins d'une bonne analyse. Dans ce cas, les écarts moyen et standard des différences entre la station et le champ analysé peuvent être calculés et on peut les considérer comme les erreurs inhérentes au système de mesure de la station (y compris les effets de l'exposition). On peut ainsi rendre très petite l'incertitude affectant l'estimation de la valeur moyenne à long terme (si rien ne change dans l'exploitation de la station), ce qui forme l'assise des études sur l'évolution du climat.

1.6.2 Définitions des mesures et de leurs erreurs

Les définitions suivantes relatives à l'exactitude des mesures sont extraites du Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie

de l'ISO (1993) qui contient beaucoup de définitions applicables aux observations météorologiques. Le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (ISO, 1995) donne des directives pratiques très utiles et détaillées pour le calcul et l'expression de l'incertitude des mesures.

- **Mesurage** : ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

- Le déroulement des opérations peut être automatique.

- **Résultat d'un mesurage** : valeur attribuée à un mesurande (la grandeur physique mesurée), obtenue par mesurage.

- Lorsqu'on donne un résultat, on indiquera clairement si l'on se réfère à l'indication, au résultat brut ou au résultat corrigé et si plusieurs valeurs ont été moyennées.

- Une expression complète du résultat d'un mesurage comprend des informations sur l'incertitude de mesure.

- **Résultat corrigé** : résultat d'un mesurage après correction de l'erreur systématique

- **Valeur (d'une grandeur)** : expression quantitative d'une grandeur particulière, généralement sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre.

Exemple : longueur d'une tige : 5,34 mètres.

- **Valeur vraie (d'une grandeur)** : valeur compatible avec la définition d'une grandeur particulière donnée. $\langle \text{valeur vraie} \rangle = \langle \text{valeur mesurée} \rangle \pm \langle \text{incertitude} \rangle$

- C'est une valeur que l'on obtiendrait par un mesurage parfait.

- Toute valeur vraie est par nature indéterminée.

- **Exactitude de mesure** : étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande.

- Le concept d'«exactitude» est qualitatif.

- Le terme "précision" ne doit pas être utilisé pour "exactitude".

- **Répétabilité (des résultats de mesurage)** : étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.

- Ces conditions sont appelées conditions de répétabilité.

- Les conditions de répétabilité comprennent :

- a) Même mode opératoire ;

- b) Même observateur ;

- c) Même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions (y compris météorologiques) ;

- d) Même lieu ;

- e) Répétition durant une courte période de temps.

- La répétabilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

- **Reproductibilité (des résultats de mesurage)** : étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure.

- Pour qu'une expression de la reproductivité soit valable, il est nécessaire de spécifier les conditions que l'on fait varier.

- Les conditions que l'on fait varier peuvent comprendre :

- a) Le principe de mesure ;

- b) La méthode de mesure ;

- c) L'observateur ;

- d) L'instrument de mesure ;

- e) L'étalon de référence ;

- f) Le lieu ;

- g) Les conditions d'utilisation (y compris les conditions météorologiques) ;

- h) Le temps.

- La reproductibilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

- Les résultats considérés ici sont habituellement des résultats corrigés.

- **Incertitude (de mesure)** : grandeur positive, associée au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

- L'incertitude de mesure comprend des composantes provenant d'effets systématiques, telles que celles associées aux corrections et aux étalons de référence ainsi qu'aux incertitudes de définition. Parfois les effets systématiques estimés ne sont pas corrigés mais les incertitudes de mesure associées sont plutôt intégrées.

- La grandeur peut être, par exemple, un écart type (ou un multiple de celui-ci) ou la demi-largeur d'un intervalle de niveau de confiance déterminé.

- L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées par une évaluation de type A de l'incertitude de mesure à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écarts types. Les autres composantes, qui peuvent être caractérisées par une évaluation de type B de l'incertitude de mesure peuvent également être caractérisées par des écarts types, évaluées à partir de fonctions densité de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'autres informations.

- Pour un ensemble d'information donné, il est en général entendu que l'incertitude de mesure est as-

sociée à une valeur numérique attribuée au mesurande. Une modification de cette valeur conduit à une modification de l'incertitude associée.

- **Erreur (de mesure)** : résultat d'un mesurage moins une valeur vraie du mesurande.

• Étant donné qu'une valeur vraie ne peut pas être déterminée, dans la pratique on utilise une valeur conventionnellement vraie.

- **Écart** : valeur moins sa valeur de référence.

• **Erreur aléatoire** : résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans des conditions de répétabilité.

• L'erreur aléatoire est égale à l'erreur moins l'erreur systématique.

• Comme on ne peut faire qu'un nombre fini de mesurages, il est seulement possible de déterminer une estimation de l'erreur aléatoire.

• **Erreur systématique** : moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans les conditions de répétabilité, moins une valeur vraie du mesurande.

• L'erreur systématique est égale à l'erreur moins l'erreur aléatoire.

• Comme la valeur vraie, l'erreur systématique et ses causes ne peuvent pas être connues complètement.

- **Correction** : valeur ajoutée algébriquement au résultat brut d'un mesurage pour compenser une erreur systématique.

1.6.3 Caractéristiques des instruments

D'autres propriétés des instruments qui doivent être prises en compte lorsque l'on considère leur exactitude sont extraites du Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie de l'ISO (1993).

- **Sensibilité** : quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée.

La valeur de la sensibilité peut dépendre de la valeur du signal d'entrée.

- **Mobilité** : aptitude d'un instrument de mesure à répondre à de petites variations de la valeur du signal d'entrée.

- **Résolution** : expression quantitative de la capacité d'un dispositif indicateur de distinguer de manière significative les valeurs adjacentes de la mesure indiquée.

• **Hystérésis** : aptitude d'un instrument de mesure à répondre à un signal d'entrée donné selon la succession des signaux d'entrée précédents.

• **Constance (d'un instrument)** : aptitude d'un instrument de mesure à conserver ses caractéristiques métrologiques constantes au cours du temps.

• **Dérive** : variation lente d'une caractéristique métrologique d'un instrument de mesure.

• **Temps de réponse** : intervalle de temps compris entre le moment où un signal d'entrée subit un changement brusque spécifié et le moment où le signal de sortie atteint, dans des limites spécifiées, sa valeur finale en régime établi et s'y maintient.

Les définitions suivantes sont fréquemment utilisées en météorologie :

• **Indication du temps de réponse** : on donne souvent le temps correspondant à 90 pour cent de la variation d'un échelon de la grandeur mesurée; celui correspondant à 50 pour cent de la variation est parfois dénommé mi-temps

• **Calcul du temps de réponse** : dans la plupart des systèmes simples, la réponse à une variation d'un échelon se calcule comme suit :

$$Y = A(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1.1)$$

où Y est la variation après l'intervalle de temps t , A est l'amplitude de la variation d'un échelon appliquée, t est le temps écoulé depuis la variation d'un échelon, τ est une variable à dimension temporelle caractéristique du système.

La variable τ appelée constante de temps ou coefficient d'inertie (de retard), représente le temps que met un instrument, après une variation d'un échelon, à atteindre 1/e de l'indication finale en régime établi.

Dans d'autres systèmes, la réponse est plus complexe et il n'en sera pas question ici (Voir aussi le chapitre 2 de la Partie III).

- **Erreur de traînage** : erreur dont peut être entaché un ensemble de mesures du fait que l'instrument d'observation a un temps de réponse fini.

1.6.4 Incertitudes de mesures propres à un instrument isolé

Le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (ISO, 1995) devrait être utilisé pour l'expression et le calcul de l'incertitude. Il donne un compte rendu pratique détaillé des définitions et des méthodes d'observation et un exposé exhaustif des méthodes

statistiques qui conviennent avec beaucoup d'exemples explicatifs.

1.6.4.1 Distribution statistique des observations

Pour déterminer l'incertitude d'une mesure quelconque, on doit d'abord adopter une approche statistique. A cette fin, les définitions suivantes ont été posées (ISO, 1993 ; 1995) :

- a) Incertitude-type ;
- b) Incertitude élargie ;
- c) Variance, écart-type ;
- d) Intervalle statistique élargi.

Si l'on effectue n comparaisons des mesures faites

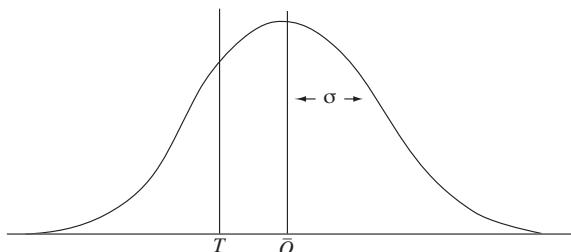


Figure I.2. Distribution des données dans une comparaison d'instruments

avec un instrument d'exploitation en maintenant constantes la variable mesurée et toutes les autres variables significatives, si la valeur vraie est établie à l'aide d'un étalon de référence et si la distribution de la variable mesurée est gaussienne⁸ les résultats peuvent être présentés comme dans la figure 1.2.

Dans cette figure, T est la valeur vraie, \bar{O} est la moyenne des n valeurs O enregistrées par l'instrument testé, et σ est l'écart type des valeurs observées par rapport à leurs valeurs moyennes.

Dans ce cas, on peut identifier les caractéristiques suivantes :

- a) L'erreur systématique, souvent appelée biais, donnée par la différence algébrique $O-T$. Les erreurs systématiques ne peuvent pas être éliminées, mais peuvent souvent être réduites. On peut appliquer un coefficient de correction pour compenser l'effet systématique. En général, des étalonnages et réglages appropriés devront être effectués pour éliminer les erreurs systématiques des capteurs. On ne peut que réduire les erreurs systématiques dues à l'environnement ou à la localisation ;
- b) L'erreur aléatoire, produite par des variations temporelles ou spatiales imprévisibles ou sto-

chastiques. Cet effet aléatoire peut être mesuré par l'écart-type σ déterminé après n mesures, n devant être suffisamment grand. En principe, σ est une mesure de l'incertitude de O ;

- c) L'exactitude du mesurage, qui est la proximité entre le résultat du mesurage et la vraie valeur du mesurande. L'exactitude d'un instrument de mesure est sa capacité à donner des résultats proches de la vraie valeur. Notons que l'exactitude est un concept qualitatif ;
- d) L'incertitude du mesurage représentant une grandeur associée au résultat du mesurage, caractérisant la dispersion des valeurs pouvant raisonnablement être attribuées au mesurande. Les incertitudes associées aux effets aléatoires et systématiques à l'origine de l'erreur peuvent être évaluées pour exprimer l'incertitude du mesurage.

1.6.4.2 Estimation de la valeur vraie

Dans la pratique normale, la valeur vraie s'estime à l'aide d'observations. S'il n'existe pas d'erreur systématique ou si on l'a éliminée des données, on peut calculer approximativement la valeur vraie en faisant la moyenne d'un très grand nombre de mesures indépendantes exécutées minutieusement. Lorsque les mesures disponibles sont peu nombreuses, leur moyenne a une distribution propre et l'on ne peut qu'indiquer certaines limites à l'intérieur desquelles il y a lieu de penser que la valeur vraie se situe. À cette fin, il faut choisir une probabilité statistique (niveau de confiance) pour les limites et connaître la distribution de l'erreur des moyennes.

Natrella (1966) a traité très utilement et clairement de la question et des sujets connexes; Eisenhart (1963) en a traité également.

1.6.4.2.1 Estimation de la valeur vraie quand n est grand

Lorsque le nombre d'observations n est grand, la distribution des moyennes des échantillons est gaussienne même si celle des erreurs d'observation ne l'est pas. Dans ce cas, ou quand on sait pour d'autres raisons que la distribution des moyennes des échantillons est gaussienne, on peut calculer ainsi les limites à l'intérieur desquelles il y a lieu de penser que la valeur vraie se situe :

$$\text{Limite supérieure} \quad L_U = \bar{X} + k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.2)$$

$$\text{Limite inférieure} \quad L_L = \bar{X} - k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.3)$$

où \bar{X} est la moyenne des observations corrigée de l'erreur systématique, σ l'écart-type de la population, et k un facteur qui peut être calculé en fonction du niveau de confiance choisi en utilisant la fonction de distribution normale.

⁸ Notons toutefois que de nombreuses variables météorologiques ne sont pas distribuées selon une loi de Gauss. Voir section 1.6.4.2.3.

Voici quelques valeurs de k :

Niveau de confiance	90 %	95 %	99 %
k	1,645	1,960	2,575

Le niveau de confiance utilisé dans le tableau ci-dessus est soumis à la condition que la valeur vraie ne dépasse pas les limites (supérieure et inférieure) à calculer. Quand on veut établir le niveau de confiance pour que la valeur vraie se trouve entre ces limites, il faut tenir compte à la fois des zones extérieures supérieures et inférieures. Sous cette réserve, on peut constater que k prend la valeur 1,96 pour une probabilité de 95 pour cent ; et que la valeur vraie de la moyenne se situe entre les limites L_U et L_L .

1.6.4.2.2 Estimation de la valeur vraie quand n est petit

Quand n est petit, les moyennes des échantillons se répartissent selon la distribution t de Student à condition que les erreurs d'observation aient une distribution gaussienne ou quasi-gaussienne. Dans ce cas, et pour un niveau de confiance donné, on peut calculer comme suit les limites supérieure et inférieure :

$$\text{Limite supérieure} \quad L_U \approx \bar{X} + t \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1.4)$$

$$\text{Limite inférieure} \quad L_L \approx \bar{X} - t \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1.5)$$

où t est un facteur (le facteur t de Student) qui dépend du niveau de confiance choisi et du nombre n de mesures, $\hat{\sigma}$ est l'estimation de l'écart-type de la population déduite des résultats des mesures en appliquant la formule :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{n}{n-1} \cdot \sigma_0^2 \quad (1.6)$$

où X_i est une valeur individuelle O_i corrigée de l'erreur systématique.

Voici quelques valeurs de t :

Niveau de confiance	90 %	95 %	99 %
dl			
1	6,314	12,706	63,657
4	2,132	2,706	4,604
8	1,860	2,306	3,355
60	1,671	2,000	2,660

où dl est le nombre de degrés de liberté, relié au nombre de mesurages par $dl = n - 1$. Le niveau de confiance utilisé dans ce tableau est fondé sur la condition que la valeur vraie ne se situe pas en dehors des limites (supérieure et inférieure) à calculer. Quand on veut établir le niveau de confiance pour que la valeur vraie se trouve entre ces limites, il faut tenir compte de la réserve formulée pour le cas où n est grand. On peut alors constater que la valeur de t est de 2,306 pour un e probabilité de 95 pour cent que la valeur vraie se situe entre les limites L_U et L_L lorsque l'estimation est faite à partir de neuf mesures ($dl=8$).

Les valeurs de t se rapprochent de celles de k à mesure que n s'accroît et l'on constate qu'elles deviennent presque égales quand le nombre de degrés de liberté est de 60. C'est pourquoi on utilise très souvent les tables de k (plutôt que celles de t) quand le nombre de mesures d'une valeur moyenne dépasse le seuil de 60.

1.6.4.2.3 Estimation de la valeur vraie – remarques complémentaires

Les chercheurs devraient examiner si la distribution des erreurs a ou non des chances d'être gaussienne. Les distributions de certaines variables, comme l'insolation, la visibilité, l'humidité et le plafond, ne sont pas gaussiennes et leur traitement mathématique doit donc s'opérer selon les règles propres à chacune d'elles (Brooks et Carruthers, 1953).

Dans la pratique, les observations contiennent à la fois des erreurs aléatoires et systématiques. Dans tous les cas, la valeur moyenne observée doit être corrigée de l'erreur systématique, pour autant qu'elle soit connue. L'estimation de la valeur vraie n'en demeure pas moins inexacte à cause des erreurs aléatoires, comme l'indiquent les expressions, et en outre à cause de toute composante inconnue de l'erreur systématique. Il faudrait fixer des limites à l'incertitude de cette dernière et les ajouter à celles des premières afin d'obtenir l'incertitude globale. On ne peut cependant connaître le niveau de confiance qu'à condition de pouvoir exprimer en termes de probabilité l'incertitude de l'erreur systématique et la combiner convenablement avec l'erreur aléatoire. Il est donc souhaitable de déterminer pleinement l'erreur systématique.

1.6.4.3 Expression de l'incertitude

Si des effets aléatoires et systématiques sont identifiés, mais que leur correction ou leur réduction est impossible ou inappliquée, l'incertitude du mesurage qui en résulte doit être estimée. Cette incertitude est déterminée après une estimation de l'incertitude résultant des effets aléatoires et de la correction imparfaite du résultat pour les effets systématiques. Il est courant d'exprimer l'incertitude comme une

« incertitude élargie » en liaison avec un « Intervalle statistique élargi ». Afin de rester cohérent avec les pratiques météorologiques courantes, on utilisera le niveau de confiance à 95 pour cent, soit $k=2$, pour tous les types de mesurages, à savoir :

$$\langle \text{incertitude élargie} \rangle = k \sigma = 2 \sigma \quad (1.7)$$

Il en résulte que la valeur vraie, définie au paragraphe 1.6.2, s'exprimera comme :

$$\langle \text{valeur vraie} \rangle = \langle \text{Valeur mesurée} \rangle \pm \langle \text{incertitude élargie} \rangle = \langle \text{valeur mesurée} \rangle \pm 2 \sigma$$

1.6.4.4 Mesurages de valeurs discrètes

Alors que l'état de l'atmosphère peut être bien décrit par des variables physiques ou des quantités, un certain nombre de phénomènes météorologiques s'expriment en termes de valeurs discrètes. L'ensoleillement, les précipitations ou les éclairs, ou encore les précipitations verglaçantes en sont des exemples. Tous ne peuvent s'exprimer que par « oui » ou « non ». Pour certaines variables, qui appartiennent toutes au groupe des phénomènes météorologiques, il existe plus de deux possibilités. Il convient de distinguer, par exemple, entre le crachin, la pluie, la neige, la grêle ou leur combinaison lorsque l'on rapporte le temps qu'il fait. Pour ces variables, les calculs d'incertitude tels que ceux qui ont été exposés ci-dessus sont inapplicables. Certaines de ces variables sont relatives à un seuil numérique (par exemple la caractérisation de l'ensoleillement utilisant l'intensité directe du rayonnement), et la détermination de l'incertitude de n'importe quelle variable dérivée (par exemple la durée d'ensoleillement), peut être calculée à partir de l'incertitude estimée de la variable mère (par exemple l'intensité du rayonnement direct). Cette méthode n'est toutefois applicable que pour les variables dérivées et non pour les phénomènes météorologiques tels qu'ils se produisent. Bien qu'une approche numérique simple ne puisse être présentée, il existe un certain nombre de techniques statistiques permettant de déterminer la qualité de telles observations. Ces techniques sont basées sur la comparaison de deux ensembles de données, l'un d'entre eux constituant une référence. Une telle comparaison permet de produire une matrice de contingence, représentant les fréquences croisées du même phénomène. Dans sa forme la plus simple, lorsque la variable est booléenne (« oui » ou « non »), la matrice possède deux lignes et deux colonnes, avec le nombre d'occurrences communes sur la première diagonale et le nombre de « coups manquants » et de « fausses alertes » dans les autres éléments. Cette matrice permet de déduire des notes ou indices de concordance représentatifs de la qualité de l'observation. Cette techni-

que décrite par Murphy et Katz (1985) et Kok (2000) en fournit un aperçu.

1.6.5 Exigences en matière d'exactitude

1.6.5.1 Généralités

L'exactitude avec laquelle une variable météorologique devrait être mesurée varie selon la destination de la mesure. En règle générale, c'est la variabilité de l'élément à mesurer aux échelles spatio-temporelles adéquates pour l'application qui limite les performances de l'instrument ou du système de mesure.

On peut considérer que toute mesure se compose de deux parties : le signal et le bruit. Le signal constitue la grandeur qu'on veut déterminer, le bruit ce qui le parasite. Le bruit peut provenir de différentes sources : l'erreur d'observation, le fait que la mesure ne soit pas effectuée au moment et à l'endroit voulus, ou encore la manifestation dans la grandeur observée d'irrégularités fugaces ou de petite échelle qui n'ont aucun rapport avec le but de l'observation et doit être éliminé par lissage. Même s'il était possible de réduire à volonté l'erreur d'observation, le bruit dû aux autres sources limiterait l'exactitude qu'il serait utile d'atteindre : parfaire la technique d'observation améliorerait la mesure du bruit sans amender sensiblement le signal.

A l'autre extrême, un instrument engendrant une erreur supérieure à l'amplitude du signal ne fournit que peu ou pas d'informations sur celui-ci. Aussi se sert-on à diverses fins des amplitudes respectives du bruit et du signal pour déterminer :

- a) le niveau de performance au-delà duquel une amélioration devient inutile ;
- b) le niveau de performance en dessous duquel l'utilité des données obtenues deviendrait négligeable.

La note technique de l'OMM (1970) a largement développé cet argument et traité de la définition et de la détermination des niveaux a) et b) dans le cas des données aérologiques. L'énoncé des exigences repose pourtant le plus souvent non sur un tel raisonnement, mais sur ce qu'on juge être d'une part le niveau de performance qu'il est possible d'atteindre pratiquement, de l'autre les besoins de ceux qui exploiteront les données.

1.6.5.2 Efficacité requise et possible

L'efficacité d'un système de mesure est fonction de sa fiabilité, de l'investissement initial et des frais d'exploitation, de sa durée de vie et de sa résolution spatiale, mais on ne s'intéresse ici qu'à l'exactitude (y compris la résolution scalaire) et à la résolution dans le temps.

Différents états des exigences ont été dressés successivement car les besoins et les capacités évoluent sans cesse. Les états fournis en annexe 1.D sont les plus autorisés au moment où cette nouvelle version du Guide est rédigée et on peut les considérer comme des références utiles, mais elles ne sont pas définitives.

Un résumé des exactitudes prescrites dans la mesure des variables les plus couramment employées en météorologie synoptique, aéronautique et maritime et en climatologie figure dans l'annexe 1.D⁹.

Il ne concerne que les mesurages de surface destinés à l'échange international. On trouvera dans OMM (1992b) le détail des exigences des centres du Système mondial de traitement des données pour les échanges à l'échelle mondiale et à l'échelle régionale. L'incertitude acceptable est indiquée séparément pour la vitesse et la direction du vent parce que c'est ainsi qu'on spécifie cet élément dans les messages d'observation.

La capacité des capteurs et systèmes d'observation à remplir les critères fixés se modifie constamment avec le perfectionnement des instruments et des techniques. On trouvera dans l'annexe 1.D¹⁰ quelles sont les caractéristiques des capteurs et systèmes couramment disponibles aujourd'hui. On notera que l'exactitude possible est bien souvent inférieure à celle prescrite. Pour certaines grandeurs, cette exactitude ne peut être atteinte qu'avec des équipements et méthodes de la meilleure qualité.

Les exigences en matière d'incertitude sur les mesurages en altitude sont traité dans le Chapitre 12 de la Partie I.

9 Établi par le groupe d'experts de la CSB sur les exigences concernant les données des stations météorologiques automatisques (2004) et approuvé par le Président de la CIMO pour être inclus dans le Guide après consultation des Présidents des autres Commissions techniques.

10 Établies par le groupe d'experts de la CIMO sur la technologie de surface et les techniques de mesure (2004), et confirmées pour inclusion dans le Guide par le Président de la CIMO.

ANNEXE 1.A

CENTRES RÉGIONAUX

1. Considérant le besoin d'un étalonnage et d'une maintenance réguliers des instruments météorologiques afin de satisfaire la demande croissante en données météorologiques et hydrologiques d'excellente qualité, le besoin d'établir la traçabilité des mesurages dans le cadre des normes du Système international d'unités (SI), la demande des membres pour une normalisation des instruments météorologiques et environnementaux apparentés, le besoin de comparaisons et d'évaluations internationales des instruments en vue d'atteindre compatibilité et homogénéité à l'échelle mondiale, le besoin de former des experts et le rôle joué par les centres régionaux d'instruments (CRI) dans les Systèmes mondiaux d'observation de la Terre, le Programme de prévention et d'atténuation des catastrophes naturelles et autres programmes transversaux de l'OMM, il a été recommandé que¹¹ :

A. Les centres régionaux d'instruments aux capacités et fonctions étendues devraient disposer des capacités ci-après pour pouvoir s'acquitter des fonctions qui leur incombent:

Capacités :

- a) Détenir les installations et le matériel de laboratoire nécessaires pour exécuter les tâches liées à l'étalonnage des instruments d'observation météorologique et de surveillance de l'environnement ou avoir accès à ce type d'installations et de matériel ;
- b) Conserver un ensemble d'étalons météorologiques et établir la traçabilité de leurs propres normes et instruments de mesure par rapport au Système international d'unités ;
- c) Disposer de cadres et de techniciens qualifiés ayant acquis l'expérience voulue pour remplir les fonctions qui leur incombent ;
- d) Élaborer des instructions techniques particulières sur la manière d'étalonner les instruments d'observation météorologique et de surveillance de l'environnement avec le matériel en leur possession ;
- e) Définir leurs propres procédures d'assurance de la qualité ;

- f) Participer à des comparaisons entre laboratoires des instruments et des méthodes d'étalonnage standard, ou organiser de telles comparaisons ;
- g) Mettre à profit les ressources et les capacités dont dispose la Région, selon qu'il convient et dans le meilleur intérêt de celle-ci ;
- h) Respecter dans la mesure du possible les normes internationales visant les laboratoires d'étalonnage, telle la norme ISO/IEC 17025 ;
- i) Être évalués par une autorité reconnue au moins tous les cinq ans afin que soient vérifiés leurs capacités et leur fonctionnement ;

Fonctions correspondantes :

- a) Aider les Membres de la Région à étalonner leurs étalons nationaux utilisés en météorologie et pour la surveillance de l'environnement ;
- b) Participer à des comparaisons OMM ou régionales d'instruments, ou organiser de telles comparaisons, selon les recommandations formulées par la CIMO ;
- c) Apporter un concours aux Membres dans le but d'accroître la qualité des mesures, conformément aux recommandations visant le cadre de référence de l'OMM pour la gestion de la qualité ;
- d) Conseiller les Membres sur les enquêtes concernant le fonctionnement des instruments, l'entretien à effectuer et les documents d'information pertinents ;
- e) Prendre activement part aux ateliers régionaux sur les instruments d'observation météorologique et de surveillance de l'environnement, ou aider à organiser de tels ateliers ;
- f) Coopérer avec les autres CRI afin de normaliser les instruments d'observation météorologique et de surveillance de l'environnement ;
- g) Transmettre régulièrement des informations aux Membres sur les services offerts et sur les activités conduites et faire rapport une fois par an¹² au président du Conseil régional et au Secrétariat de l'OMM à ce sujet.

B. Les centres régionaux d'instruments dotés de capacités et fonctions de base devraient disposer des capacités ci-après pour pouvoir s'acquitter des fonctions qui leur incombent :

Capacités :

- a) Détenir les installations et le matériel de laboratoire nécessaires pour exécuter les tâches

¹¹ Recommandation de la Commission des instruments et méthodes d'observation lors de sa quatorzième session, tenue en 2006.

¹² On recommande une approche utilisant le Web.

- liées à l'étalonnage des instruments d'observation météorologique et de surveillance de l'environnement ;
- b) Conserver un ensemble d'étalons météorologiques¹³ et établir la traçabilité de leurs propres normes et instruments de mesure par rapport au Système international d'unités ;
 - c) Disposer de cadres et de techniciens qualifiés ayant acquis l'expérience voulue pour remplir les fonctions qui leur incombent ;
 - d) Élaborer des instructions techniques particulières sur la manière d'étalonner les instruments d'observation météorologique et de surveillance de l'environnement avec le matériel en leur possession ;
 - e) Définir leurs propres procédures d'assurance de la qualité ;
 - f) Participer à des comparaisons entre laboratoires des instruments et des méthodes d'étalonnage standard, ou organiser de telles comparaisons ;
 - g) Mettre à profit les ressources et les capacités dont dispose la Région, selon qu'il convient et dans le meilleur intérêt de celle-ci ;
 - h) Respecter dans la mesure du possible les normes internationales visant les laboratoires d'étalonnage, telle la norme ISO/IEC 17025 ;
 - i) Etre évalués par une autorité reconnue au moins tous les cinq ans afin que soient vérifiés leurs capacités et leur fonctionnement ;

Fonctions correspondantes :

- a) Aider les Membres de la Région à étalonner leurs étalons nationaux utilisés en météorologie et pour la surveillance de l'environnement selon les capacités b) ;

- b) En accord avec les recommandations pertinentes sur le cadre de gestion de la qualité de l'OMM, un CRI doit fournir aux Membres une contribution concrète concernant la qualité des mesurages ;
- c) Conseiller les Membres sur les enquêtes concernant le fonctionnement des instruments, l'entretien à effectuer et les documents d'information pertinents ;
- d) Coopérer avec les autres CRI afin de normaliser les instruments d'observation météorologique et de surveillance de l'environnement ;
- e) Un CRI doit régulièrement informer les Membres et adresser chaque année un rapport¹⁴ au Président de l'Association régionale et au Secrétariat de l'OMM sur les services offerts aux Membres et les activités réalisées.

2. Les CRI suivants ont été désignés par les associations régionales concernées : Alger (Algérie), Le Caire (Egypte), Casablanca (Maroc), Nairobi (Kenya) et Gaborone (Botswana) pour la Région I; Beijing (Chine) et Tsukuba (Japon) pour la Région II; Buenos Aires (Argentine) pour la Région III; Bridgetown (La Barbade), Mount Washington (Etats-Unis d'Amérique) et San José (Costa Rica) pour la région IV; Manille (Philippines) et Melbourne (Australie) pour la Région V ; Bratislava (Slovaquie), Ljubljana (Slovénie) et Toulouse (France) pour la Région VI.

13 Pour étalonner une ou plusieurs des variables suivantes : température, humidité, pression ou autres spécifiées par la Région.

14 On recommande une approche utilisant le Web.

ANNEXE 1.B

CLASSIFICATION DE SITES POUR LES STATIONS TERRESTRES D'OBSERVATION

L'environnement d'un site¹⁵ de mesure peut engendrer des erreurs de mesure supérieures aux erreurs instrumentales. On accorde en général davantage d'attention aux caractéristiques de l'instrument qu'à l'environnement de la mesure ; c'est pourtant souvent cet environnement qui fausse le résultat et altère sa représentativité, en particulier lorsqu'un site est censé représenter une zone relativement étendue (soit entre 100 et 1 000 km²).

Dans le Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques (OMM-N° 8), l'OMM dicte les règles de dégagement applicables aux différents capteurs. Mais que faut-il faire quand les conditions décrites ne sont pas réunies ?

Il existe des sites qui ne respectent pas ces règles de dégagement. C'est pourquoi on établit une classification des sites de mesure permettant de déterminer leur représentativité à petite échelle (influence de l'environnement proche). Ainsi un site de classe 1 sera considéré comme un site de référence, tandis qu'un site de classe 5 sera un site où des obstacles proches créent un environnement inapproprié à l'exécution de mesures météorologiques censées être représentatives d'une zone étendue (d'au moins quelques dizaines de kilomètres carrés) et où il est déconseillé d'exécuter de telles mesures. Mieux le site sera classé et plus la mesure sera représentative d'une zone étendue. Bien que comportant des obstacles altérant les mesures, un site de classe médiocre (chiffre de classe élevé) peut néanmoins présenter un intérêt pour une application particulière.

À chaque type de mesures exécutées dans un site correspond une classification distincte.

La présente classification, à laquelle est associé un niveau d'incertitude pour les mesures, permet de définir des niveaux à respecter pour qu'une station puisse appartenir à un réseau ou puisse être utilisée dans le cadre d'une application donnée. L'idéal serait que tous les sites appartiennent à la classe 1, mais, dans la réalité, la perfection étant difficile à atteindre, certains compromis se révèlent nécessaires. Il est donc préférable d'accepter cette situation et de la décrire, ce qui est proposé dans cette classification des sites de mesure.

À en juger par l'expérience acquise à Météo-France, le processus de classification aide les acteurs et les directeurs de réseaux à mieux prendre en considéra-

tion les règles de dégagement, ce qui a souvent pour conséquence d'améliorer le choix du site. Quel que soit le site, les métadonnées permettent d'en connaître les caractéristiques. Il est évidemment possible et recommandé d'établir une description complète du site, mais l'augmentation de la complexité des métadonnées risque d'en restreindre l'emploi, ce qui est souvent le cas en exploitation. C'est pourquoi cette classification des sites de mesure se propose de condenser l'information pour faciliter l'exploitation effective des métadonnées.

Cette classification ne s'applique pas directement à l'ensemble d'une station d'observation, puisque, en fait, une classe est attribuée à chaque paramètre qu'on y mesure, le niveau pouvant parfois varier en fonction des paramètres. S'il s'avère nécessaire de classer l'ensemble d'un site, il est alors possible d'utiliser la classe de chiffre de code supérieur, parmi celles attribuées aux différents paramètres qui y sont mesurés.

Il y a lieu de revoir périodiquement la classification d'un site, car son environnement peut varier dans le temps. Il est recommandé de procéder chaque année à une vérification visuelle systématique et de déterminer ainsi s'il y a lieu de relancer le processus de classification quand certains aspects des alentours ont évolué.

Il y a lieu de ne pas laisser passer plus de cinq ans entre chaque actualisation complète des classes attribuées aux sites.

Dans le texte qui suit, la classification est complétée (parfois) par une estimation de l'incertitude due au site, qu'il faut ajouter à l'incertitude associée à la mesure. Cette estimation découle d'études bibliographiques ou de certains tests comparatifs.

La classification a pour objectif premier de décrire la présence d'obstacles dans les alentours immédiats du site de mesure. Il est donc possible qu'il ne soit pas tenu compte du relief naturel si celui-ci est éloigné (par exemple, distance supérieure à 1 km). Pour établir si le relief propre au paysage alentour est représentatif, il suffit de se demander si le fait de déplacer la station sur une distance de 500 m en changerait la classification. Si la réponse est négative, c'est que le relief constitue une caractéristique naturelle de la région et qu'il n'est pas à prendre en compte.

¹⁵ Un « site » est défini comme le lieu où est installé un instrument.

En terrain complexe ou en zone urbaine, les classes attribuées sont en général celles des rangs à grands chiffres de code. Dans ce cas, il est possible d'ajouter, après le numéro des classes 4 ou 5, l'indicateur «S» pour signifier qu'il s'agit d'un environnement particulier ou d'une application spéciale (exemple: 4S).

TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ DE L'AIR

Les capteurs à l'intérieur de l'abri doivent être installés à une hauteur standard (comprise entre 1,25 et 2 m, comme indiqué dans ce Guide), fixée par le Service météorologique. La hauteur ne doit être, en aucun cas, inférieure à 1,25 m. Elle pourra cependant dépasser la valeur fixée, car le rapport du gradient de température à la hauteur diminue avec la hauteur. À titre d'exemple, les différences entre 1,5 et 2 m ne dépassent pas 0,2 °C.

Les plus grands écarts sont causés par les surfaces artificielles et par les ombres portées.

(a) Les obstacles se trouvant autour de l'abri influent sur son équilibre radiatif. Un abri installé près d'un obstacle vertical risque d'être «protégé» du rayonnement solaire ou du refroidissement radiatif nocturne de l'air, se trouvant sous l'influence du rayonnement infrarouge relativement chaud de l'obstacle ou du rayonnement que celui-ci réfléchit.

(b) Il y a lieu d'éviter de positionner des capteurs près de surfaces artificielles qui risquent de réchauffer l'air. L'importance de leur influence est fonction des conditions de vent, car le vent influe sur les échanges d'air. Les surfaces artificielles à prendre en compte sont les sources de chaleur, les surfaces réfléchissantes (bâtiments, aires bétonnées, parcs de stationnement, etc.) et les étendues d'eau (mares, lacs, zones irriguées, etc.).

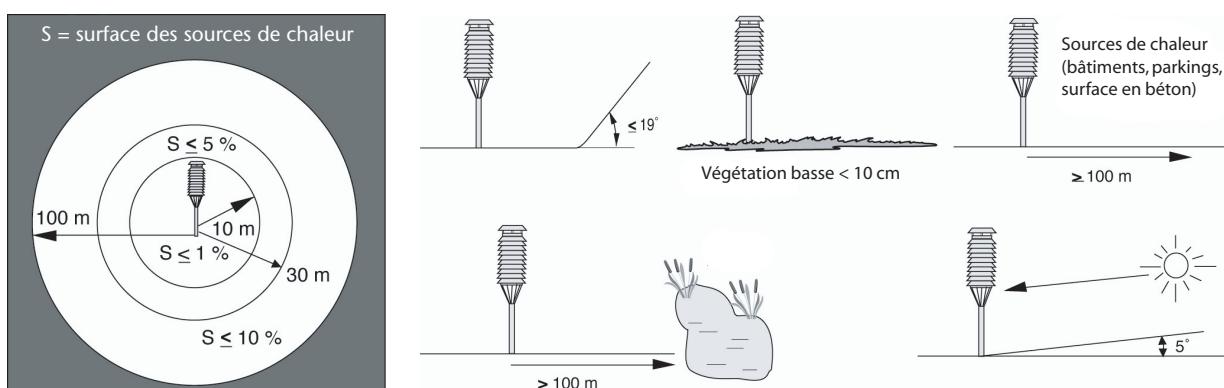
Il y a lieu d'éviter les ombres portées dues aux obstacles proches. La classification ne tient pas compte des ombres portées correspondant au relief naturel (voir ci-dessus).

Les hauteurs de végétation indiquées correspondent aux hauteurs de végétation que l'on pourrait obtenir sur le site avec un entretien «normal». Il convient donc de faire la différence entre une hauteur de végétation structurelle (fonction du type de végétation sur le site) et une hauteur liée à un mauvais entretien. C'est pourquoi il est demandé de classer le site en considérant qu'il est entretenu (sauf si un tel entretien est structurellement impossible).

Classe 1

- (a) Terrain plat et horizontal, entouré d'une surface de dégagement dont la pente est inférieure à 1/3 (19°);
- (b) Sol recouvert de végétation naturelle basse (< 10 cm) représentative de la région;
- (c) Point de mesure situé:
 - À plus de 100 m de sources de chaleur artificielles ou surfaces réfléchissantes (bâtiments, aires bétonnées, parcs de stationnement, etc.);
 - À plus de 100 m d'étendues d'eau (sauf si elles sont significatives de la région);
 - À l'écart de toute ombre portée lorsque la hauteur du soleil est supérieure à 5°.

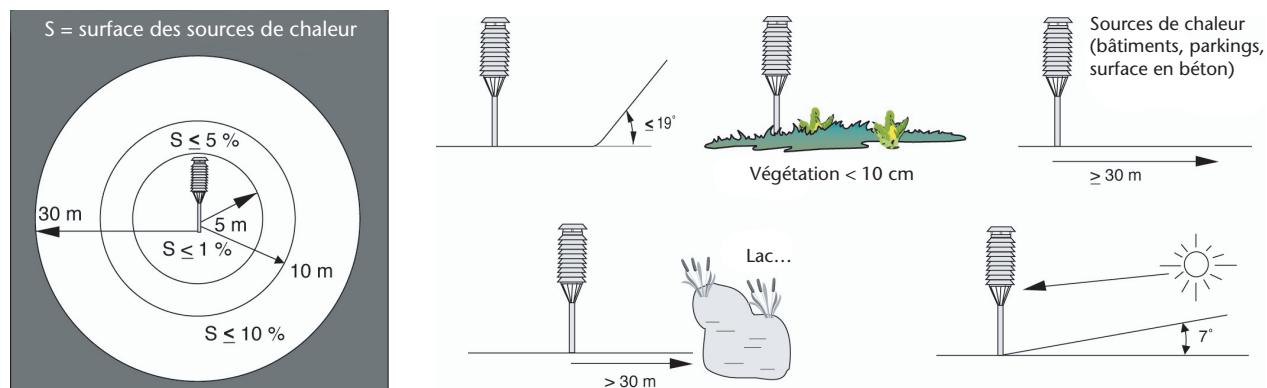
Une source de chaleur (ou une étendue d'eau) est considérée comme gênante si elle occupe une portion de surface supérieure à 10 % dans un cercle de rayon de 100 m autour de l'abri, ou une portion de 5 % dans une couronne de rayon de 10 à 30 m, ou une portion de 1 % dans un rayon de 10 m.



Classe 2

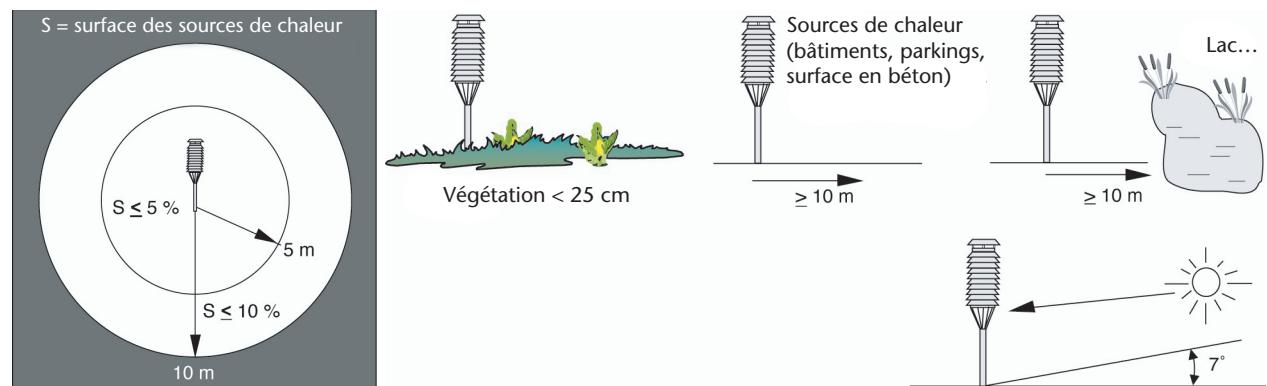
- (a) Terrain plat et horizontal, entouré d'une surface de dégagement dont la pente est inférieure à $1/3$ (19°);
 (b) Sol recouvert de végétation naturelle basse (< 10 cm) représentative de la région;
 (c) Point de mesure situé:
- À plus de 30 m de sources de chaleur artificielles ou surfaces réfléchissantes (bâtiments, aires bétonnées, parcs de stationnement, etc.);
 - À plus de 30 m d'étendues d'eau (sauf si elles sont significatives de la région);
 - À l'écart de toute ombre portée lorsque la hauteur du soleil est supérieure à 7° .

Une source de chaleur (ou une étendue d'eau) est considérée comme gênante si elle occupe une portion de surface supérieure à 10 % dans un cercle de rayon de 30 m autour de l'abri, ou une portion de 5 % dans une couronne de rayon de 5 à 10 m, ou une portion de 1 % dans un rayon de 5 m.

**Classe 3 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 1 °C)**

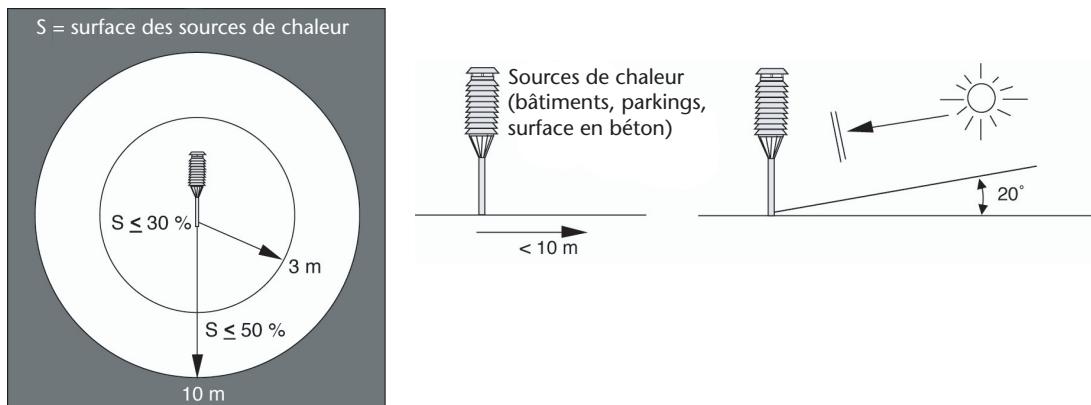
- (a) Sol recouvert de végétation naturelle basse (< 25 cm) représentative de la région;
 (b) Point de mesure situé:
- À plus de 10 m de sources de chaleur artificielles ou surfaces réfléchissantes (bâtiments, aires bétonnées, parcs de stationnement, etc.);
 - À plus de 10 m d'étendues d'eau (sauf si elles sont significatives de la région);
 - À l'écart de toute ombre portée lorsque la hauteur du soleil est supérieure à 7° .

Une source de chaleur (ou une étendue d'eau) est considérée comme gênante si elle occupe une portion de surface supérieure à 10 % dans un cercle de rayon de 10 m autour de l'abri, ou une portion de 5 % dans un rayon de 5 m.



Classe 4 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 2 °C)

- (a) Sources de chaleur artificielles ou surfaces réfléchissantes (bâtiments, aires bétonnées, parcs de stationnement, etc.) ou étendues d'eau (sauf si elles sont significatives de la région) proches représentant:
- Moins de 50 % de la surface dans un rayon de 10 m autour de l'abri;
 - Moins de 30 % de la surface dans un rayon de 3 m autour de l'abri.
- (b) Point de mesure situé à l'écart de toute ombre portée lorsque la hauteur du soleil est supérieure à 20°.

**Classe 5** (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 5 °C)

Site ne respectant pas les critères de la classe 4.

PRÉCIPITATIONS

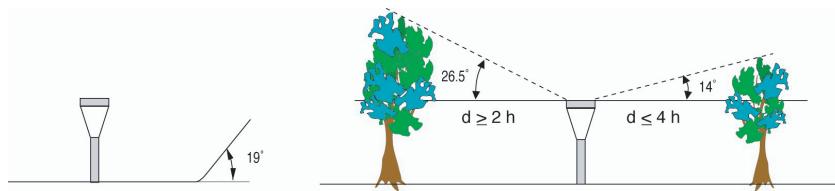
Le vent est le phénomène perturbateur le plus important pour la mesure des précipitations, en raison de l'effet de l'instrument sur l'écoulement de l'air. À moins que les pluviomètres soient protégés artificiellement contre le vent, à l'aide d'un écran par exemple, les sites qui conviennent le mieux sont souvent des clairières au milieu de forêts ou de vergers, des terrains entourés d'arbres ou situés dans des forêts de broussailles ou d'arbustes ou encore des terrains où d'autres obstacles constituent des coupe-vent efficaces, quelle que soit la direction d'où vient le vent. Les conditions idéales d'implantation correspondent à une installation en un lieu entouré uniformément d'obstacles de hauteur uniforme. Un obstacle est un objet dont la largeur angulaire est égale ou supérieure à 10°.

Le choix d'un tel site est incompatible avec les contraintes correspondantes à la hauteur des autres instruments de mesure. De telles conditions sont pratiquement irréalistes. Si les obstacles ne sont pas uniformes, ils peuvent créer des turbulences gênantes pour la mesure, leur effet étant plus prononcé en cas de précipitations solides. C'est pourquoi des règles de dégagement plus réalistes demandent un éloignement des obstacles. L'orientation des obstacles par rapport à la direction des vents dominants n'est volontairement pas prise en compte. En effet, des précipitations fortes sont souvent associées à des phénomènes convectifs, pour lesquels la direction du vent n'est pas forcément celle des vents dominants. On estime que les obstacles sont de hauteur uniforme quand le rapport entre le plus haut et le moins haut est inférieur à 2.

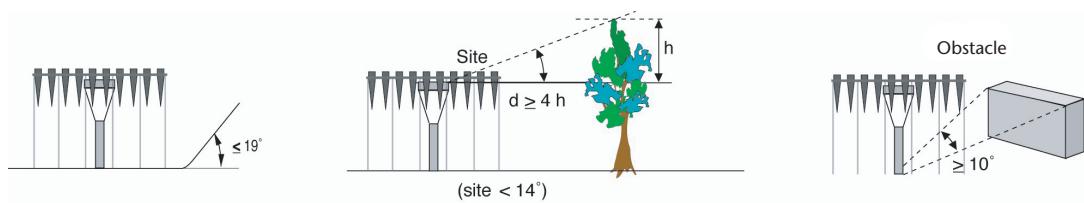
Le collecteur du pluviomètre (hauteur de captation) sert de point de référence pour mesurer la hauteur des obstacles.

Classe 1

- (a) Terrain plat et horizontal, entouré d'une surface de dégagement dont la pente est inférieure à 1/3 (19°). Le pluviomètre est entouré d'obstacles de hauteur uniforme, dont la hauteur angulaire est comprise entre 14 et 26,5° (qui se situent donc à une distance comprise entre deux et quatre fois leur hauteur);
- (b) Terrain plat et horizontal, entouré d'une surface de dégagement dont la pente est inférieure à 1/3 (19°). Le pluviomètre est protégé artificiellement du vent; il n'est donc pas nécessaire qu'il soit entouré d'obstacles de hauteur uniforme. Dans ce cas, tout autre obstacle se situe à une distance d'au moins quatre fois sa hauteur.

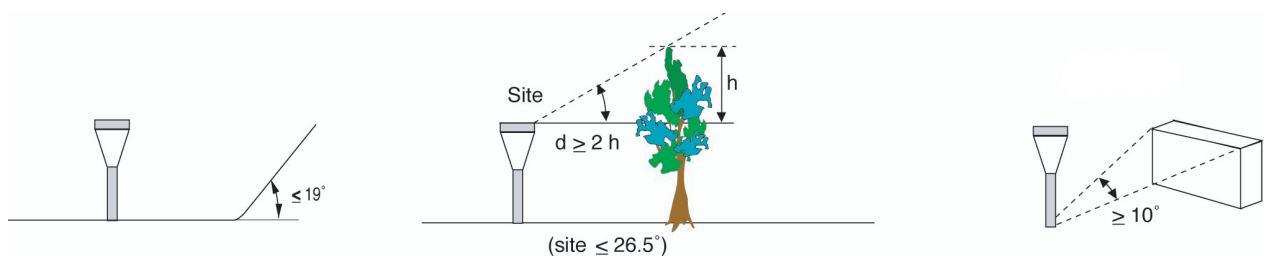


ou



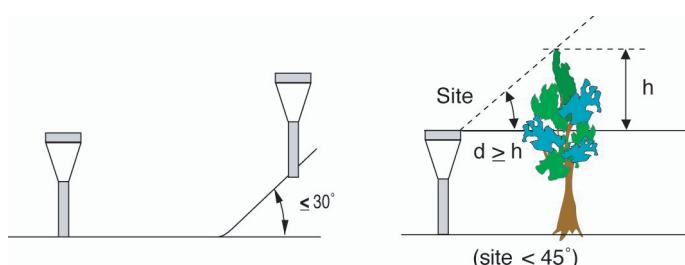
Classe 2 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 5 %)

- (a) Terrain plat et horizontal, entouré d'une surface de dégagement dont la pente est inférieure à $1/3$ (19°);
- (b) Les obstacles éventuels se situent à une distance d'au moins deux fois leur hauteur (par rapport à la hauteur de captation du pluviomètre).



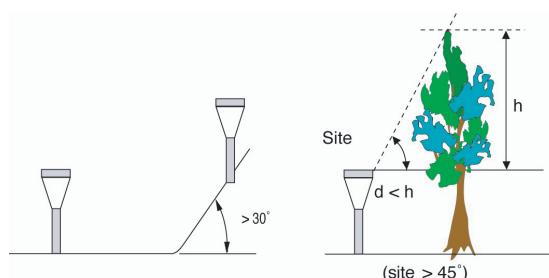
Classe 3 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 15 %)

- (a) Terrain entouré d'une surface de dégagement dont la pente est inférieure à $1/2$ ($\leq 30^\circ$);
- (b) Les obstacles éventuels se situent à une distance supérieure à leur hauteur.



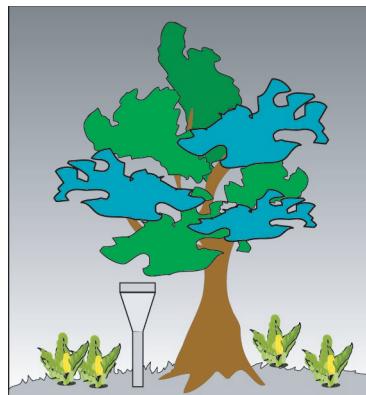
Classe 4 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 25 %)

- (a) Terrain avec forte pente ($> 30^\circ$);
- (b) Les obstacles éventuels se situent à une distance supérieure à la moitié de leur hauteur.



Classe 5 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 100 %)

Les obstacles se situent à une distance inférieure à la moitié de leur hauteur (arbre, toit, mur, etc.).

**VENT DE SURFACE**

Selon les règles usuelles, les capteurs sont placés à 10 m au-dessus du sol et sur un terrain dégagé, c'est-à-dire une surface où les obstacles se situent à une distance d'au moins dix fois leur hauteur.

RUGOSITÉ

La mesure du vent n'est pas perturbée uniquement par les obstacles environnants; la rugosité du terrain exerce aussi une influence. Pour l'OMM, le vent de surface mesuré aux stations terrestres est le vent qui soufflerait à une hauteur géométrique de 10 m sur un site ayant une longueur de rugosité égale à 0,03 m.

C'est en quelque sorte un vent de référence dont on connaît les conditions exactes de mesure (hauteur: 10 m et longueur de rugosité: 0,03 m).

Il convient donc de décrire la rugosité du terrain autour du site de mesure. La longueur de rugosité sert à convertir le vent mesuré en vent de référence, mais cette méthode ne peut s'appliquer que si les obstacles éventuels sont suffisamment éloignés. Le chapitre 5 du Guide traite la question de la rugosité et celle des méthodes de correction.

Voici, repris ci-dessous, le tableau de classification de la rugosité qui figure dans la partie I, chapitre 5 :

**Classification des terrains selon la longueur de rugosité aérodynamique z_0
d'après Davenport (1960), adapté par Wieringa (1980)**

Indice	Brève description du terrain	z_0 (m)
2	Vasières, terrain enneigé; ni végétation, ni obstacles	0,005
3	Terrain plat et dégagé; herbe, quelques obstacles isolés	0,03
4	Cultures basses; gros obstacles occasionnels: $x/H > 20$	0,10
5	Cultures hautes; obstacles dispersés: $15 < x/H < 20$	0,25
6	Bois, broussailles; nombreux obstacles: $x/H \sim 10$	0,5
7	Gros obstacles régulièrement répartis (banlieues, forêts)	1,0
8	Agglomérations comprenant des bâtiments de diverses hauteurs	≥ 2

Note : En ce cas, x est la distance type jusqu'aux obstacles au vent et H , la hauteur des principaux obstacles correspondants. Davenport et al. (2000) fournit une description détaillée et à jour de cette classification.

CLASSIFICATION DE L'ENVIRONNEMENT

La présence d'obstacles se traduit (presque toujours) par une diminution du vent moyen, mais a un effet moindre sur les rafales.

Dans la classification qui suit, on considère que la mesure est effectuée à 10 m, à savoir la hauteur conventionnelle pour les mesures météorologiques.

Dans le cas de mesures exécutées à des hauteurs inférieures (à 2 m par exemple comme c'est parfois le cas à des fins agroclimatologiques), la classe de rang 4 ou 5 est attribuée (voir ci-après) avec l'indicateur «S» (situation particulière).

En présence d'obstacles nombreux de hauteur supérieure à 2 m, il est recommandé d'élever la hauteur de mesure de façon que les capteurs se trouvent à 10 m au-dessus de la hauteur moyenne de ces obstacles. Cette méthode permet ainsi de minimiser l'influence de ces obstacles proches. C'est une solution permanente permettant de s'affranchir en partie de la présence de certains obstacles. Elle présente l'inconvénient de nécessiter un mât plus grand qui, n'étant pas standard, est donc plus cher. Elle est à envisager pour certains sites. Dans ce cas, la hauteur des obstacles à prendre en compte est leur hauteur au-dessus du niveau situé 10 m en dessous des capteurs (par exemple, pour un anémomètre installé à une hauteur de 13 m, le point de référence pour mesurer la hauteur des obstacles se situe à 3 m au-dessus du sol; donc si un obstacle mesure 7 m, on considère que sa hauteur effective est de 4 m).

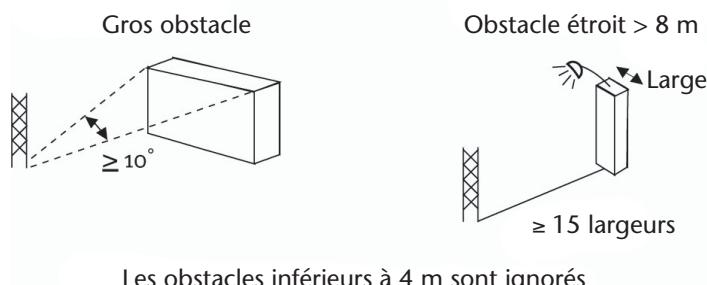
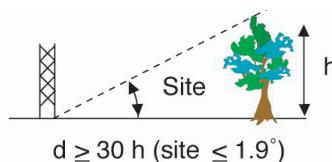
Dans ce qui suit, un objet est considéré comme un obstacle s'il présente une largeur angulaire supérieure à 10° , sauf s'il s'agit d'un obstacle haut et étroit, comme cela est indiqué ci-dessous.

Les variations d'altitude (positives ou négatives) proches n'étant pas représentatives de la région sont considérées comme des obstacles.

Classe 1

- (a) Le pylône est installé à une distance au moins égale à 30 fois la hauteur des obstacles environnants;
- (b) Les capteurs se situent à une distance au moins égale à 15 fois la largeur des obstacles étroits (mât, arbre mince) dépassant une hauteur de 8 m;

Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 4 m peuvent être négligés.



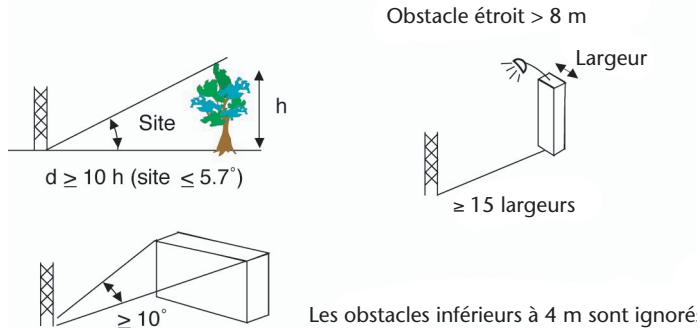
- L'indice de rugosité est compris entre 2 et 4 (longueur de rugosité $\leq 0,1$ m).



Classe 2 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 30 %, correction possible)

- (a) Le pylône est installé à une distance au moins égale à 10 fois la hauteur des obstacles environnants;
- (b) Les capteurs se situent à une distance au moins égale à 15 fois la largeur des obstacles étroits (mât, arbre mince) dépassant une hauteur de 8 m;

Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 4 m peuvent être négligés.



- L'indice de rugosité est compris entre 2 et 5 (longueur de rugosité ≤ 0,25 m).

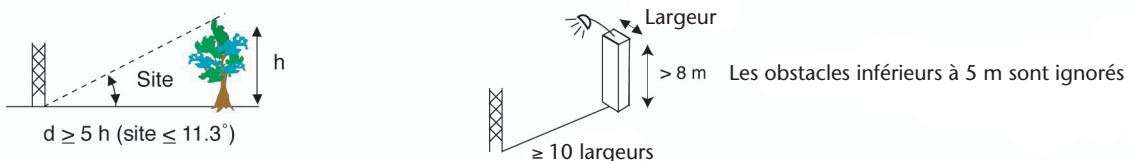


Remarque : Si le pylône se situe à une distance au moins égale à 20 fois la hauteur des obstacles environnants, il est possible d'appliquer une correction (voir le chapitre portant sur la mesure du vent). Quand les obstacles se situent à une distance inférieure, il est encore possible d'appliquer une correction dans certaines situations.

Classe 3 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 50 %, correction impossible)

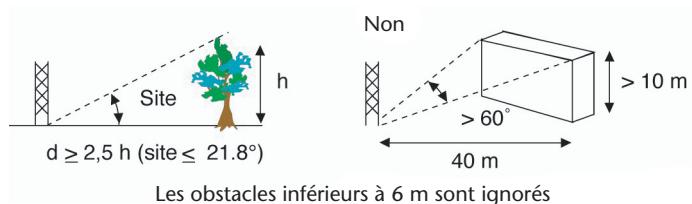
- (a) Le pylône est installé à une distance au moins égale à 5 fois la hauteur des obstacles environnants;
- (b) Les capteurs se situent à une distance au moins égale à 10 fois la largeur des obstacles étroits (mât, arbre mince) dépassant une hauteur de 8 m.

Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 5 m peuvent être négligés.

**Classe 4** (erreur supplémentaire due au site supérieure à 50 %)

- (a) Le pylône est installé à une distance au moins égale à 2,5 fois la hauteur des obstacles environnants;
- (b) il ne doit pas y avoir d'obstacles, vus sur une largeur angulaire supérieure à 60°, et d'une hauteur supérieure à 10 m, dans un rayon de 40 m.

Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 6 m peuvent être négligés, à condition que les mesures soient exécutées à une hauteur minimale de 10 m.



Classe 5 (erreur supplémentaire due au site impossible à déterminer)

- Site ne respectant pas les critères de la classe 4.

RAYONNEMENT GLOBAL ET DIFFUS

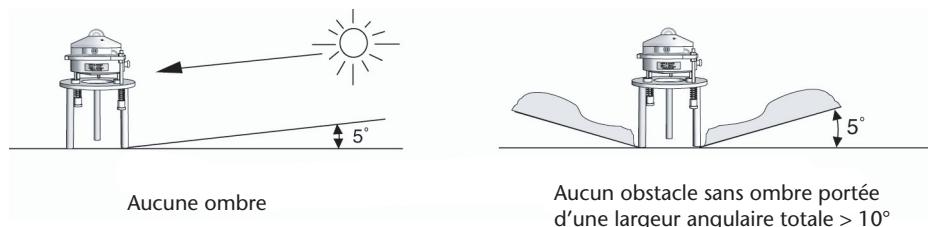
Il convient d'éviter les sites comprenant des obstacles relativement proches. La classification ne tient pas compte des ombres portées correspondant au relief naturel.

Les obstacles non réfléchissants se situant sous l'horizon visible peuvent être négligés.
On considère qu'un obstacle est réfléchissant si son albédo est supérieur à 0,5.

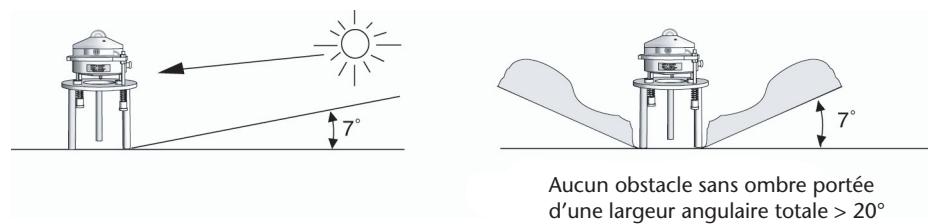
L'élément sensible de l'instrument constitue le point de référence des angles de site.

Classe 1

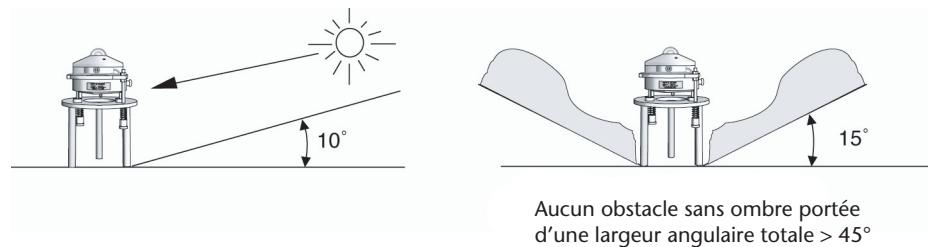
- Aucune ombre portée sur le capteur lorsque le soleil est à une hauteur angulaire supérieure à 5° . Pour les régions situées sous des latitudes $\geq 60^\circ$, cette limite passe à 3° ;
- Aucun obstacle réfléchissant, sans ombre portée, vu à une hauteur angulaire supérieure à 5° et d'une largeur angulaire totale supérieure à 10° .

**Classe 2**

- Aucune ombre portée sur le capteur lorsque le soleil est à une hauteur angulaire supérieure à 7° . Pour les régions situées sous des latitudes $\geq 60^\circ$, cette limite passe à 5° ;
- Aucun obstacle réfléchissant, sans ombre portée, vu à une hauteur angulaire supérieure à 7° et d'une largeur angulaire totale supérieure à 20° .

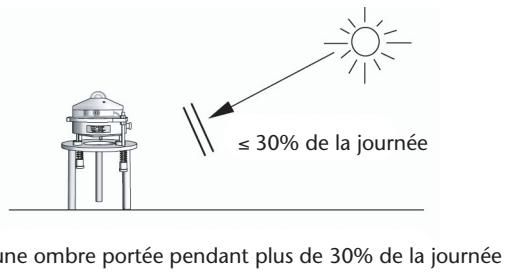
**Classe 3**

- Aucune ombre portée sur le capteur lorsque le soleil est à une hauteur angulaire supérieure à 10° . Pour les régions situées sous des latitudes $\geq 60^\circ$, cette limite passe à 7° ;
- Aucun obstacle réfléchissant, sans ombre portée, vu à une hauteur angulaire supérieure à 15° et d'une largeur angulaire totale supérieure à 45° .



Classe 4

- Aucune ombre portée sur le capteur pendant plus de 30 % de la journée, quel que soit le jour de l'année.



Aucune ombre portée pendant plus de 30% de la journée

Classe 5

- Ombre portée sur le capteur pendant plus de 30 % de la journée, au moins un jour dans l'année.

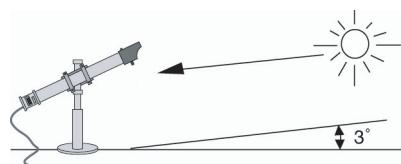
RAYONNEMENT DIRECT ET DURÉE D'INSOLATION

Il convient d'éviter les sites comprenant des obstacles relativement proches. La classification ne tient pas compte des ombres portées correspondant au relief naturel. Les obstacles non réfléchissants se situant sous l'horizon visible peuvent être négligés.

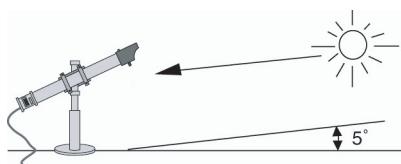
L'élément sensible de l'instrument constitue le point de référence des angles de site.

Classe 1

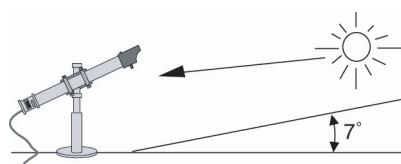
- Aucune ombre portée sur le capteur lorsque le soleil est à une hauteur angulaire supérieure à 3° .

**Classe 2**

- Aucune ombre portée sur le capteur lorsque le soleil est à une hauteur angulaire supérieure à 5° .

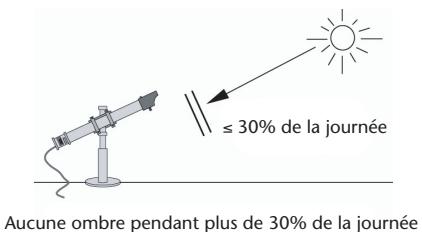
**Classe 3**

- Aucune ombre portée sur le capteur lorsque le soleil est à une hauteur angulaire supérieure à 7° .



Classe 4

- Aucune ombre portée sur le capteur pendant plus de 30 % de la journée, quel que soit le jour de l'année.



Aucune ombre pendant plus de 30% de la journée

Classe 5

- Ombre portée sur le capteur pendant plus de 30 % de la journée, au moins un jour dans l'année.

ANNEXE 1.C

DESCRIPTION DE L'EXPOSITION DES STATIONS

L'exactitude avec laquelle une observation décrit une partie choisie de l'atmosphère ne se confond pas avec l'incertitude de l'instrument, car la valeur de l'observation dépend aussi de l'exposition de l'instrument vis à vis de l'atmosphère. Ce n'est pas un problème technique et sa description relève donc de la responsabilité de l'observateur ou de son assistant. En pratique, un site idéal parfaitement exposé est rarement disponible et, à moins que l'exposition réelle ne soit adéquatement documentée, la fiabilité des observations ne peut être déterminée (OMM, 2002).

Les métadonnées de la station doivent contenir les aspects suivants de l'exposition des instruments :

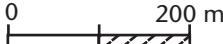
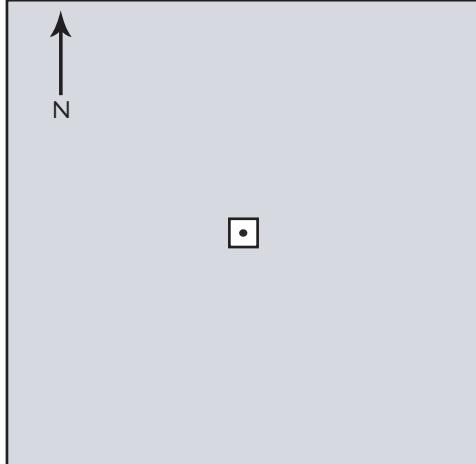
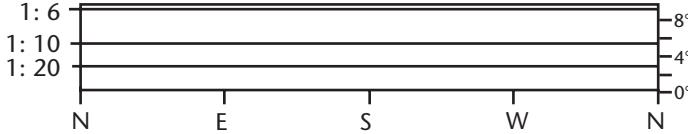
- a) Hauteur des instruments au dessus de la surface du sol (ou en dessous pour la température du sol) ;
- b) Type d'abri et de ventilation pour la température et l'humidité ;
- c) Degré d'interférence avec d'autres instruments ou objets (pylônes, ventilateurs) ;
- d) Description fine et topographie fine de l'environnement de l'instrument, en particulier :
 - Nature de la surface de l'enclos, influençant la température et l'humidité ; obstacles importants proches (bâtiments, clôtures, arbres) et leur taille ;
 - Degré d'obstruction de l'horizon pour les observations d'ensoleillement et de rayonnement ;
 - Rugosité des terrains environnants et végétation, influençant le vent ;
 - Caractéristiques topographiques du terrain telles que pentes, dallages, eaux libres ;

- Caractéristiques à grande échelle du terrain, telles que côtes, montagnes ou urbanisation.

La plupart de ces éléments sont quasi permanents, mais tout changement significatif (croissance de la végétation, nouvelles constructions) doivent être enregistrées, et datées, dans le livre de bord de la station.

Pour documenter la topographie de l'exposition, une carte à l'échelle d'au moins 1 :25000, comportant des courbes de niveau d'un mètre d'équidistance, est souhaitable. On devra indiquer sur cette carte la localisation (et la hauteur) des bâtiments et des arbres, la nature des sols et les instruments installés. Aux marges de la carte, on doit indiquer les principales caractéristiques éloignées du terrain (par exemple, surfaces bâties, forêts, eaux libres, reliefs). Les photographies sont utiles si elles ne sont pas étroitement centrées sur les instruments ou les abris, mais sont prises à une distance suffisante pour montrer les instruments dans leur environnement. De telles photographies devraient être prises sous tous les angles.

On trouvera, en remplissant le formulaire-type fourni à la page suivante pour toutes les stations du réseau, le minimum nécessaire de métadonnées concernant l'exposition des instruments (Voir figure 1.3), et dans OMM (2003b) un exemple de la marche à suivre. Les classes utilisées ici pour la description de la rugosité des terrains sont fournies dans le chapitre 5 de la partie I du Guide. On trouvera dans OMM (2010b) un exposé plus détaillé de la question des métadonnées.

Station	Mise à jour		
Altitude	Latitude	Longitude	
 ● Enclos ■■■■■ Bâtiment // Route x x Arbres, buissons (12) Hauteur (m) de l'obstacle  Courbe de niveau			
Profil de rayonnement incident			
			
Température et humidité :	Hauteur du capteur		
Type de surface sous l'instrument	Ventilation artificielle ?	oui/non	
Type de sol sous l'instrument			
Précipitations : Hauteur de la bague du pluviomètre			
Vent :	Hauteur de l'anémomètre	Indépendant ?	oui/non
(Si la réponse est non : hauteur du bâtiment largeur longueur)			
Classe de rugosité du terrain : vers le Nord, vers l'Est, vers le Sud, vers l'Ouest			
Remarques :			

Modèle général pour les métadonnées concernant l'exposition des stations

EXIGENCES CONCERNANT L'INCERTITUDE DES MESURAGES OPÉRATIONNELS ET PERFORMANCE DES INSTRUMENTS

(Voir les notes explicatives en dessous du tableau; la première ligne contient les numéros de colonne)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Variable	Domaine de variation	Résolution rapportée	Mode de mesurement/ observation	Incertitude de mesure exigée	Constante de temps du capteur	Temps de base du signal de sortie	Incertitude de mesure réalisable	Remarques	
1. Température									
1.1	Température de l'air	-80 - +60°C	0,1 K	1	0,3 K pour ≤ -40°C 0,1 K pour > -40°C et ≤ +40°C 0,3 K pour > +40°C	20 s	1 min	0,2 K	La conception de l'abri protégeant les thermomètres du rayonnement solaire peut affecter l'incertitude possible et la constante de temps effective. La constante de temps dépend de la ventilation du capteur.
1.2	Extrêmes de la température de l'air	-80 - +60°C	0,1 K	1	0,5 K pour ≤ -40°C 0,3 K pour > -40°C et ≤ +40°C 0,5 K pour > +40°C	20 s	1 min	0,2 K	
1.3	Température de surface	-2 - +40°C	0,1 K	1	0,1 K	20 s	1 min	0,2 K	
1.4	Température du sol	-50 - +50°C	0,1 K	1		20 s	1 min	0,2 K	
2. Humidité									
2.1	Température du point de rosée	-80 - +35°C	0,1 K	1	0,1 K	20 s	1 min	0,25 K	L'incertitude du mesurement dépend de l'écart à la température de l'air.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Variable	Domaine de variation	Résolution rapportée	Mode de mesure/ observation	Incertitude de mesure exigée	Constante de temps du capteur	Temps de base du signal de sortie	Incertitude de mesure réalisable	Remarques
Température de bulbe humide (psychromètre)								
2.2	Humidité relative	0 - 100%	1%	1%	20 s	1 min	0,2 K	Si mesuré directement en combinaison avec la température de l'air (bulbe sec) Grosses erreurs possibles dues à des problèmes de ventilation et de propreté (voir aussi note 11). À noter le seuil de 0°C pour le bulbe humide.
Semi-conducteurs et autres								
					40 s	1 min	3%	La constante de temps et l'incertitude réalisable des capteurs à semi-conducteurs peuvent être influencées par la température et l'humidité.
3. Pression atmosphérique								
3.1	Pression	500 - 1 080 hPa	0,1 hPa	-	0,1 hPa	2 s	1 min	0,15 hPa Pression à la station et au NIMM L'incertitude de mesure est sérieusement affectée par la pression dynamique due au vent si des précautions ne sont pas prises. Une mauvaise correction de la température du transducteur peut sérieusement affecter l'incertitude du mesurage. La pression au NIMM est affectée par l'incertitude sur l'altitude du baromètre embarqué.
3.2	Tendance	Non spécifié	0,1 hPa	-	0,2 hPa			0,2 hPa Différence entre valeurs instantanées.

PARTIE I - MESURE DE VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Variable	Domaine de variation	Résolution rapportée	Mode de mesurage/ observation	Incertitude de mesure exigée	Constante de temps du capteur	Temps de base du signal de sortie	Incertitude de mesure réalisable	Remarques	
4. Nuages									
4.1 Nébulosité	0/8 - 8/8	1/8	1	1/8	NA	~ 10 m	2/8	Possible d'utiliser algorithmes d'amas pour estimer la nébulosité de l'étage inférieur	
4.2 Plafond	0 m - 30 km	10 m	1	10 m pour ≤ 100 m 10% pour > 100 m	NA			L'incertitude réalisable peut être déterminée grossièrement. Il n'existe pas de définition claire du plafond mesuré par un instrument (profondeur de pénétration ou discontinuité significative du profil d'extinction). Biais significatif pendant les précipitations.	
4.3 Altitude du sommet des nuages				NA					
5. Vent									
5.1 Vitesse	0 - 75 m s ⁻¹	0,5 m s ⁻¹	A	0,5 m s ⁻¹ pour ≤ 5 m s ⁻¹ 10% pour > 5 m s ⁻¹	Constante de distance 2 - 5 m	2 et/ou 10 min	0,5 m s ⁻¹ pour ≤ 5 m s ⁻¹ 10% pour > 5 m s ⁻¹	Moyenne sur 2 et/ou 10 min Dispositifs non-linéaires. Attention à la conception du moyennage. On qualifie généralement la constante de distance de longueur de réponse. Moyennes calculées en coordonnées cartésiennes (voir Section 3, Chapitre 3 de la Partie III de ce Guide).	
5.2 Direction	0 - 360°	1°	A	5°	Rapport d'amortissement $> 0,3$	2 et/ou 10 min	5°	Ni constante de distance, ni constante de temps ne sont nécessaires avec les anémomètres ultrasoniques. Pour les stations mobiles, le mouvement de la station doit être pris en compte, y compris pour l'incertitude.	

Variable	Domaine de variation	Résolution rapportée	Mode de mesurage/observation	Incertitude de mesurage exigée	Constante de temps du capteur	Temps de base du signal de sortie	Incertitude de mesure réalisable	Remarques
5.3 Rafales	0,1 - 150 m s ⁻¹	0,1 m s ⁻¹	A	10%	3 s	0,5 m s ⁻¹ pour ≤ 5 m s ⁻¹ 10% pour > 5 m s ⁻¹	La plus grande moyenne sur 3 s doit être enregistrée	
6. Précipitation								
6.1 Hauteur (journalière)	0 - 500 mm	0,1 mm	T	0,1 mm pour ≤ 5 mm 2% pour > 5 mm	NA	NA	Le maximum de 5% ou de 0,1 mm	Quantité basée sur les hauteurs journalières.
							L'incertitude dépend de l'efficacité aérodynamique du collecteur et des pertes par évaporation dans les pluviomètres chauffés.	
6.2 Hauteur de neige	0 - 25 m	1 cm	I	1 cm pour ≤ 20 cm 5% pour > 20 cm	< 10 s	1 min	1 cm	Hauteur moyenne sur une aire représentative du site d'observation.
6.3 Épaisseur de l'accrétion de glace sur les navires	Non spécifié	1 cm	I	1 cm pour ≤ 10 cm 10% pour > 10 cm				
6.4 Intensité de la précipitation	0,02 mm h ⁻¹ - 2 000 mm h ⁻¹	0,1 mm h ⁻¹	I	(trace) : nd pour 0,02 - 0,2 mm h ⁻¹ pour 0,2 - 0,1 mm h ⁻¹ pour 0,2 - 2 mm h ⁻¹ 5% pour > 2 mm h ⁻¹	< 30 s	1 min	En régime permanent au laboratoire 5% au-dessus de 2 mm/h 2% au-dessus de 10 mm/h si < 0,2 mm h ⁻¹ :	Valeurs d'incertitude pour les précipitations liquides seulement. L'incertitude est sérieusement affectée par le vent. Le comportement des capteurs peut se révéler fortement non-linéaire. Détection (oui/non)
6.5 Durée de précipitation (journalière)	0 - 24 h	60 s	T	NA	NA	60 s	Sur le terrain La constante de temps des capteurs est sérieusement affectée pendant les 100 mm/h	Seuil de 0,02 mm/h

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Variable	Domaine de variation	Résolution rapportée	Mode de mesurage/ observation	Incertitude de mesurage exigée	Constante de temps du capteur	Temps de base du signal de sortie	Incertitude de mesurage réalisable		Remarques	
7. Rayonnement										
7.1 Durée de l'ensoleillement (journalière)	0 - 24 h	60 s	T	0,1 h	20 s	NA	Le maximum de 0,1 h ou 2%			
7.2 Rayonnement net, exposition énergétique (journalière)	Non spécifié	1 j m ⁻²	T	0,4 MJ m ⁻² pour ≤ 8 MJ m ⁻² 5% pour > 8 MJ m ⁻²	20 s	NA	0,4 MJ m ⁻² pour ≤ 8 MJ m ⁻² 5% pour > 8 MJ m ⁻²	Exposition énergétique exprimée en total journalier de rayonnement net		
8. Visibilité										
8.1 Portée optique météorologique (POV)	10 m - 100 km	1 m	I	50 m pour ≤ 600 m 10% pour > 600 m - ≤ 1 500 m 20 % pour > 1 500 m	< 30 s	1 et 10 min	Le maximum de 20 m et 20%	L'incertitude de mesure réalisable peut dépendre de la cause de l'obscurcissement.		
								La quantité à moyenner est le coefficient d'extinction (Voir Section 3.6, du chapitre 3, Partie III de ce guide). On préférera un moyennage logarithmique des valeurs.		
8.2 Portée visuelle de piste	10 m - 2 000 m	1 m	A	10 m pour ≤ 400 m 25 m pour > 400 m - ≤ 800 m 10 % pour > 800 m	< 30 s	1 et 10 min	Le maximum de 20 m et 20%	Selon OMM -No. 49, Volume II, Annexe A (2004) et ICAO Doc 9328-AN/908 (Second ed., 2000)		
								De nouvelles versions de ces documents peuvent indiquer d'autres valeurs.		
8.3 Luminance de fond	0 - 40 000 cd m ⁻²	1 cd m ⁻²	I		30 s	1 min	10%	A approcher de 8.2 PVP		
9. Vagues										
9.1 Hauteur de vague significative	0 - 50 m	0,1 m	A	0,5 m pour ≤ 5 m 10% pour > 5 m	0,5 s	20 min	0,5 m pour ≤ 5 m 10% pour > 5 m	Moyenne sur 20 min pour les mesures instrumentales.		

<i>Variable</i>	<i>Domaine de variation</i>	<i>Résolution rapportée</i>	<i>Mode de mesurement/ observation</i>	<i>Incertitude de mesure exigée</i>	<i>Constante de temps du capteur</i>	<i>Temps de base du signal de sortie</i>	<i>Incertitude de mesure réalisable</i>	<i>Remarques</i>
9.2 Période des vagues	0 - 100 s	1 s	A	0,5 s	0,5 s	20 min	0,5 s	Moyenne sur 20 min pour les mesures instrumentales.
9.3 Direction des vagues	0 - 360°	1°	A	10°	0,5 s	20 min	20°	Moyenne sur 20 min pour les mesures instrumentales.
10. Évaporation 10.1 Hauteur de l'évaporation au bac	0 - 100 mm	0,1 mm	T	0,1 mm pour ≤ 5 mm 2% pour > 5 mm	nd			

Notes:

- La colonne 1 indique la variable de base.
- La colonne 2 indique la plage de variation courante de la plupart des variables; les limites dépendent des conditions climatologiques locales.
- La colonne 3 indique la résolution la plus contraignante selon le Manuel des codes (OMM-No. 306).
- En colonne 4 :
- I = Instantané : Afin d'éviter la variabilité naturelle à petite échelle et le bruit, on considère qu'une moyenne sur 1 mn est un minimum et qu'elle est convenable; on peut accepter des moyennes établies jusqu'à sur 10 minutes.
- A = Moyenne : Valeurs moyennes sur une période, selon les spécifications du codage.
- T = Totaux : Totaux sur une période, selon les spécifications du codage.
- La colonne 5 indique les exigences d'incertitude de mesure recommandées pour l'utilisation opérationnelle générale, c'est à dire le niveau de données II selon FM 12, 13, 14, 15 et ses équivalents BUFR. Elles ont été adoptées par les huit commissions techniques et sont applicables pour la météorologie synoptique, aéronautique, agricole et marine, l'hydrologie, la climatologie, etc.. Ces exigences sont applicables tant aux stations météorologiques manuelles qu'automatics telles que définies dans le Manuel du Système mondial d'observation (OMM-No. 544). Les applications particulières peuvent avoir des exigences moins contraintantes. La valeur spécifiée de l'incertitude de mesure représente l'incertitude de la valeur rapportée par rapport à la vraie valeur et indique l'intervalle dans lequel se trouve la vraie valeur avec une probabilité recommandé est de 95 % (k = 2), qui correspond à 2 pour une distribution normale (Gaussienne) de la variable. L'hypothèse que toutes les corrections connues ont été prises en compte implique que les erreurs des valeurs rapportées auront une valeur moyenne (biais) proche de zéro. Tout biais résiduel devra être petit vis à vis de l'exigence de l'incertitude de mesure spécifiée. La vraie valeur est celle qui, dans les conditions opérationnelles, caractérise parfaitement la variable à mesurer/observer sur un intervalle de temps représentatif et dans un domaine spatial défini, prenant en compte la localisation et l'exposition.
- Les colonnes 2 à 5 se réfèrent aux exigences établies en 2004 par le groupe d'experts sur les exigences des stations météorologiques de la CIMO.
- Les colonnes 6 à 8 se réfèrent aux performances usuelles établies en 2004 par le groupe d'experts sur la technologie de surface et les techniques de mesure de la CIMO.
- L'incertitude de mesure réalisable (Colonne 8) est basée sur les performances des capteurs pour leur l'exposition nominale et recommandée pouvant être obtenues en pratique opérationnelle. On doit la considérer comme une assistance aux utilisateurs pour définir des exigences réalisables et abordables.
- NA = Non applicable.
- On préférera le terme incertitude à précision (Selon les normes ISO sur l'incertitude des mesurages (ISO, 1995)).
- La température du point de rosée, l'humidité relative et la température de l'air sont liées, et leurs incertitudes le sont aussi. Pour le moyennage on donnera la préférence à l'humidité absolue comme variable principale.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Brooks, C.E.P. and N. Carruthers, 1953 : *Handbook of Statistical Methods in Meteorology*. MO 538, Meteorological Office, London.
- Bureau International des Poids et Mesures/Comité Consultatif de Thermométrie, 1990 : The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) (H. Preston Thomas). *Metrologia*, 1990, 27, pp. 3–10.
http://iopscience.iop.org/0026-1394/27/1/002/pdf/0026-1394_27_1_002.pdf
- Bureau International des Poids et Mesures, 2006 : Le système international d'unités SI, Huitième édition, BIPM, Sèvres/Paris.
http://www.bipm.org/utils/common/pdf/si_brochure_8_fr.pdf
- Eisenhart, C., 1963 : Realistic evaluation of the precision and accuracy of instrument calibration systems. National Bureau of Standards-C, Engineering and Instrumentation, *Journal of Research*, Volume 67C, Number 2, April–June 1963.
- Kok, C.J., 2000 : *On the Behaviour of a Few Popular Verification Scores in Yes/No Forecasting*. Scientific Report, WR-2000-04, KNMI, De Bilt.
- Linacre, E., 1992 : *Climate Data and Resources – A Reference and Guide*. Routledge, London, 366 pp.
- Murphy, A.H. et R.W. Katz (eds.), 1985 : *Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences*. Westview Press, Boulder.
- National Institute of Standards and Technology, 1995 : *Guide for the Use of the International System of Units (SI)* (B.N. Taylor). NIST Special Publication No. 811, Gaithersburg, United States.
- Natrella, M.G., 1966 : *Experimental Statistics*. National Bureau of Standards Handbook 91, Washington DC.
- Organisation de l'Aviation Civile Internationale, 2002 : Manuel du Système géodésique mondial – 1984 (WGS-84). OACI Doc 9674–AN/946. Seconde édition, Québec, 142 p.
- Organisation Internationale de Normalisation, 1993 : Grandeur et unités. ISO 31:1992, Troisième édition, Genève.
http://www.iso.org/iso/fr/support/faqs/faqs_widely_used_standards/widely_used_standards_other/quantities_and_units.htm
- Organisation Internationale de Normalisation, 1995 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Publié au nom de BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP et OIML, Première édition, Genève.
http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_F.pdf
- Organisation Internationale de Normalisation, 2008 : Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie. Préparé by BIPM/ISO/OIML/IEC/IFCC/IUPAC et IUPAP, Troisième édition, Genève.
- Union Internationale de Physique Pure et Appliquée, 1987 : *Symbols, Units, Nomenclature and Fundamental Constants in Physics*. SUNAMCO Document IUPAP-25 (E.R. Cohen and P. Giacomo), repris de *Physica* 146A, pp. 1–68.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1966 : Tables météorologiques internationales (Préparées par S. Letestu) (modifiées en 1973), OMM-No. 188. TP.94, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1970 : *Performance Requirements of Aerological Instruments* (C.L. Hawson). Technical Note No. 112, OMM-No. 267. TP.151, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1981 : *Guide des pratiques de météorologie agricole*. Deuxième édition, OMM-No. 134, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1983 : *Guide to Climatological Practices*. Second edition, OMM-No. 100, Genève (updates available at <http://www.wmo.int/web/wcp/ccl/>).
- Organisation Météorologique Mondiale, 1988 : *Règlement technique*. Volume I, Appendice A, OMM-No. 49, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1989 : Guide du système mondial d'observation. OMM-No. 488, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1990 : Guide des systèmes d'observation et de diffusion de l'information pour l'assistance météorologique à la navigation aérienne. OMM-No. 731, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1992a : Vocabulaire météorologique international. Deuxième édition, OMM-No. 182, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1992b : Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision. Volume I –Aspects mondiaux, Annexe I-2, OMM-No. 485, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1993a : *Siting and Exposure of Meteorological Instruments* (J. Ehinger). Instruments and Observing Methods Report No. 55, OMM/TD-No. 589, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1993b : Messages météorologiques. Volume A – Stations d'observation, OMM-No. 9, Genève.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Organisation Météorologique Mondiale, 1994 : *Guide des pratiques hydrologiques*. Cinquième édition, OMM-No. 168, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 2001 : *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel*. Second edition, OMM-No. 551, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 2002 : Station exposure metadata needed for judging and improving the quality of observations of wind, temperature and other parameters (J. Wieringa and E. Rudel). *Papers Presented at the OMM Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*, Instruments and Observing Methods Report No. 75, OMM/TD-No. 1123, Genève.
<http://www.knmi.nl/samenw/geoss/wmo/TECO2002/Table-contents.htm>
- Organisation Météorologique Mondiale, 2003a : Manuel du Système mondial d'observation. Volume I – Aspects mondiaux, OMM-No. 544, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 2003b : Guidelines on Climate Metadata and Homogenization (P. Llansó, ed.). World Climate Data and Monitoring Programme (WCDMP) Series Report No. 53, OMM/TD-No. 1186, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 2009 : Commission technique mixte OMM/COI d'océanographie et de météorologie maritime, OMM-No. 1049, Genève.
- Orlanski, I., 1975 : A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56, pp. 527-530.

CHAPITRE 2

MESURE DE LA TEMPÉRATURE

2.1 GÉNÉRALITÉS

2.1.1 Définition

L'OMM (1992) définit la température comme une grandeur physique caractérisant l'agitation moyenne des molécules dans un corps physique. La température est la traduction du comportement de deux corps en contact thermique qui tendent à égaliser leur température. Ainsi, la température représente l'état thermodynamique d'un corps et sa valeur est déterminée par son aptitude à communiquer de la chaleur à d'autres corps ou à en recevoir. Dans un système comprenant deux corps, on dit que celui qui cède de la chaleur à l'autre se trouve à la température la plus élevée. Il est néanmoins difficile de définir la température comme une grandeur physique lorsque l'on parle de « l'état d'un corps ». La solution trouvée a été de définir une échelle de température internationalement reconnue fondée sur le point de congélation et le point triple universel¹. L'échelle actuellement utilisée est l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90)² exprimée sous la forme T_{90} . En matière d'amplitude météorologique (- 80 à + 60° C) cette échelle se fonde sur une relation linéaire entre la température et la résistance électrique du platine et le triple point de l'eau, définie comme égale à 273,16 kelvins (BIPM, 1990).

Pour les besoins de la météorologie, les températures sont mesurées dans un certain nombre de milieux. La variable la plus fréquemment mesurée est la température de l'air (à différentes hauteurs). Les autres variables sont la température minimale du sol, du sol herbeux et la température de l'eau de mer. L'OMM (1992) définit la température de l'air ainsi : « température indiquée par un thermomètre exposé à l'air et à l'abri du rayonnement solaire direct ». Cette définition ne peut certes pas s'appliquer à la grandeur thermodynamique elle-même, mais elle peut convenir dans la plupart des applications.

2.1.2 Unités et échelles de température

La température thermodynamique (T), exprimée en kelvins (K), (également désignée par *température Kelvin*), est la température de base. L'échelle Kelvin est définie en assignant la valeur de 273,16 K au point triple de l'eau pure. Pour la plupart des besoins météorologiques, la température est ramenée à l'échelle Celsius (ou *température Celsius*) où la température

(t) (à partir du point de gel de référence secondaire, voir l'annexe, tableau 2) est définie par l'équation suivante :

$$t/^\circ\text{C} = T/\text{K} - 273,15 \quad (2.1)$$

Une différence de un degré Celsius ($^\circ\text{C}$) équivaut à une différence de un degré kelvin (K). Il convient de noter que le Kelvin n'est jamais suivi du symbole degré.

Dans l'échelle thermodynamique de température, les mesures équivalent aux écarts par rapport au zéro absolu (0 K), soit la température à laquelle les molécules de n'importe quelle substance ne possèdent aucune énergie cinétique. L'échelle de température couramment utilisée depuis 1990 est l'Échelle internationale de température (EIT) de 1990 (voir annexe), qui est fondée sur les valeurs des températures assignées à un certain nombre d'états d'équilibre reproductibles (voir annexe, tableau 1) et sur des instruments spécifiés étalonnés à ces températures. L'EIT a été établie de manière à ce que température mesurée soit identique à la température thermodynamique, tout écart devant se situer dans les limites actuelles d'incertitude de la mesure. L'EIT, outre les points fixes, comporte des points de référence secondaires (voir l'annexe, tableau 2). Les températures qui présentent un intérêt météorologique sont calculées par interpolation entre les points fixes en appliquant les formules standards données en annexe.

2.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

2.1.3.1 Généralités

Dans le domaine de la météorologie, les besoins en matière de mesure portent essentiellement sur la température :

- (a) de l'air près de la surface de la Terre ;
- (b) de la surface du sol ;
- (c) du sol à différentes profondeurs ;
- (d) à la surface de la mer et des lacs ;
- (e) en altitude.

¹ L'organisme faisant autorité pour cette échelle est le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres (Paris) ; consultez le site <http://www.bipm.org>. Le Comité consultatif de thermométrie du BIPM est l'organe exécutif chargé de l'élaboration et de la mise en œuvre de l'EIT.

² Informations pratiques sur l'EIT-90 consultables sur le site : <http://www.its-90.com>.

Ces mesures, réalisées conjointement ou séparément, à l'échelle locale ou mondiale, sont indispensables pour alimenter les modèles de prévision numérique du temps, à des fins hydrologiques ou agricoles, ou encore comme indicateurs de la variabilité du climat. La température locale a également une importance physiologique directe pour les activités quotidiennes de la population mondiale. Il peut être nécessaire de disposer de relevés continus de la température ou de relevés échantillons, à différents intervalles de temps.

Le présent chapitre porte sur les mesures mentionnées aux alinéas a), b) et c).

2.1.3.2 Exigences d'exactitude

La plage de mesure, la résolution du relevé et l'exactitude requise sont détaillées au chapitre 1 de la partie I. Dans la pratique, il n'est pas nécessairement économique de faire appel à des thermomètres qui permettent d'obtenir directement de tels résultats. On utilise plutôt des instruments moins coûteux qu'on étalonne à l'aide d'un thermomètre étalon de laboratoire et on corrige les mesures si nécessaire. Il est indispensable de limiter l'ampleur des corrections afin de maintenir les erreurs résiduelles à un niveau acceptable. Par ailleurs, la plage d'utilisation du thermomètre sera choisie de manière à refléter l'amplitude thermique observée localement. À titre d'exemple, le tableau ci-dessous donne une plage d'étalonnage et d'erreurs acceptable pour des thermomètres couvrant une plage de mesure type.

Chaque instrument de mesure de température est généralement accompagné d'un certificat de conformité aux spécifications d'incertitude et de perfor-

Caractéristiques techniques des thermomètres

Type de thermomètre	Ordinaire	À maximum	À minimum
Étendue de l'échelle (°C)	- 30 à + 45	- 30 à + 50	- 40 à + 40
Plage d'étalonnage (°C)	- 30 à + 40	- 25 à + 40	- 30 à + 30
Erreur maximale	< 0,2 K	0,2 K	0,3 K
Écart maximal entre les corrections maximale et minimale dans la plage	0,2 K	0,3 K	0,5 K
Variation maximale de la correction dans un intervalle de 10° C	0,1 K	0,1 K	0,1 K

mance, ou d'un certificat d'étalonnage qui précise la correction à appliquer pour obtenir le degré d'incertitude voulu. Les essais initiaux et l'étalonnage sont de préférence réalisés par un laboratoire national d'essais. Il est ensuite recommandé de contrôler régulièrement ces instruments, l'appareil utilisé pour cette opération étant fonction du type d'instrument ou de capteur à étalonner.

2.1.3.3 Temps de réponse des thermomètres

Il n'y a pas avantage à employer des thermomètres à constante de temps ou coefficient d'inertie très faible dans le cadre d'observations régulières de la température dans la mesure où la température de l'air varie en permanence d'un à deux degrés en l'espace de quelques secondes. Il faudrait ainsi prendre la moyenne de plusieurs relevés pour obtenir une valeur représentative, alors qu'un thermomètre à constante de temps élevée tend à lisser les fluctuations rapides. Une constante de temps trop longue peut toutefois engendrer des erreurs lorsque les variations de température s'étendent sur de longues périodes. Il est recommandé d'adopter une constante de temps, définie comme le laps de temps nécessaire au thermomètre pour enregistrer 63,2 % d'une variation d'un échelon de la température de l'air, égale à 20 s. La constante de temps dépend de l'écoulement d'air au niveau de capteur.

2.1.3.4 Enregistrement des circonstances dans lesquelles sont effectuées les mesures

La température est l'une des variables météorologiques dont la mesure est particulièrement sensible à l'exposition. Dans les études climatiques en particulier, les mesures de température sont influencées par l'environnement, végétation, présence de bâtiments et d'objets divers, couverture du sol, état de l'abri ou de l'écran de protection contre le rayonnement et modifications apportées à sa conception d'origine ou autres modifications des équipements. Il est important de conserver un enregistrement, non seulement des données relatives à la température mais aussi des circonstances dans lesquelles sont effectuées les mesures. Ces informations sont connues sous l'appellation de métadonnées (données destinées à définir ou décrire d'autres données).

2.1.4 Méthodes de mesure

Pour mesurer la température d'un objet, on peut amener un thermomètre à la même température que l'objet en question (c'est-à-dire le mettre en équilibre thermodynamique avec cet objet), puis mesurer la température du thermomètre. La température peut aussi être mesurée à l'aide d'un radiomètre sans qu'il soit besoin d'atteindre l'équilibre thermique.

Le fonctionnement d'un thermomètre peut être fondé sur toute propriété physique d'une substance sur laquelle la température peut avoir une incidence. Les thermomètres utilisés dans le domaine de la météorologie font essentiellement appel à la dilation thermique et aux variations de la résistance électrique liées à la température. Les thermomètres radiométriques fonctionnent dans la bande infrarouge du spectre électromagnétique et sont utilisés, entre autres, pour mesurer la température depuis les satellites. Une technique particulière mise au point pour déterminer la température de l'air par échantillonnage des ultrasons pour calculer la vitesse de l'air, fournit également la vitesse moyenne des molécules d'air et donc la température de ce dernier (OMM, 2002a).

Les thermomètres qui indiquent la température ambiante sont souvent appelés thermomètres ordinaires alors que ceux qui indiquent les températures extrêmes dans un intervalle de temps sont appelés thermomètres à maximum ou à minimum.

Un certain nombre d'ouvrages classiques traitent de la conception des instruments et des pratiques de laboratoire en matière de mesure de la température, voir notamment Jones (1992) ou Middleton et Spilhaus (1960). Dans le domaine de la thermométrie, il faut bien être conscient que seules des technologies bien spécifiques peuvent s'appliquer à la météorologie en raison des contraintes imposées par un climat ou un environnement type.

2.1.4.1 **Implantation et exposition du thermomètre**

Le rayonnement émis par le soleil, les nuages, le sol et les objets alentours traverse l'atmosphère sans sensiblement faire varier la température, mais un thermomètre exposé à l'air libre peut néanmoins absorber une quantité considérable de rayonnement. En conséquence, sa température peut différer de la température réelle de l'air, la différence dépendant de l'intensité du rayonnement et du rapport rayonnement absorbé/chaleur dissipée. Dans certains cas, notamment dans celui d'un thermomètre à résistance pourvu d'un fil très fin, l'écart peut être faible, voire négligeable, mais dans le cas des thermomètres utilisés plus couramment en météorologie, il peut atteindre 25 K dans des conditions extrêmement défavorables. C'est pourquoi il convient de protéger le thermomètre contre le rayonnement à l'aide d'un abri ou d'un écran qui lui servira de support. Cet écran met également ce dernier à l'abri des précipitations, tout en assurant sa ventilation et une protection contre les dommages accidentels. Si le capteur est exposé aux précipitations, sa température baisse en fonction du flux d'air local, et le thermomètre se comporte alors comme un thermomètre mouillé. Il

peut néanmoins s'avérer difficile de maintenir une bonne circulation d'air dans des conditions de gravage. Il existe diverses pratiques pour limiter les erreurs d'observation dans de telles conditions et on peut faire appel à des écrans ou des instruments de mesure de la température spéciaux, notamment à la ventilation artificielle. Toutefois, dans ce dernier cas, il faudra veiller à éviter tout effet imprévu causé par des dépôts humides liés à l'évaporation en cas de précipitation, de bruine, de brouillard et similaire. Sparks (1970) donne un aperçu des concepts de mesure de température applicables en condition d'exploitation.

Il est par ailleurs indispensable que les conditions d'exposition de l'écran, et donc du thermomètre lui-même, soient normalisées si l'on veut que les résultats comparatifs des valeurs relevées en des heures et des lieux différents soient représentatifs. En météorologie générale, la température de l'air observée doit être représentative des conditions de l'air libre dans un périmètre aussi étendu que possible autour de la station d'observation, à une hauteur située entre 1,2 et 2,0 m au-dessus de sol. Une telle prescription s'explique par les gradients de température verticaux élevés que l'on peut observer dans les couches inférieures de l'atmosphère. En conséquence, le site idéal pour procéder aux mesures se situe en terrain plat, normalement exposé au soleil et au vent, à distance respectable d'arbres, de bâtiments ou autres obstacles susceptibles de les masquer. Les pentes raides ou les cuvettes sont à éviter en raison des conditions exceptionnelles qui y règnent. En agglomération les particularités locales sont probablement plus marquées qu'en milieu rural. Les mesures de température effectuées sur le toit des bâtiments sont sujettes à caution en raison de la variabilité du gradient thermique vertical et de l'effet du bâtiment lui-même sur la répartition de la température.

2.1.4.2 **Étalons de température**

• Étalons de laboratoire

Les thermomètres étalons primaires sont conservés dans des laboratoires nationaux de référence. Un laboratoire national de météorologie ou autre laboratoire d'étalonnage agréé détient, comme étalon de travail, un thermomètre à résistance de platine de grande pureté, susceptible d'être relié à l'étalon national. L'exactitude de ce thermomètre peut être vérifiée périodiquement dans une cellule à point triple de l'eau. Le point triple de l'eau est défini de manière exacte et peut être reproduit dans une cellule à point triple de l'eau avec une incertitude de 1×10^{-4} K.

• Étalons de terrain

Le psychromètre de l'OMM (OMM, 1992) est l'instrument de référence destiné à déterminer la relation entre la température de l'air mesurée à l'aide

d'instruments de surface classiques et la température réelle de l'air. Il est conçu pour être utilisé de manière autonome, c'est-à-dire sans écran ni abri. Il s'agit de l'instrument le plus précis actuellement disponible pour évaluer et comparer les systèmes instrumentaux. Il n'est en revanche pas conçu pour être utilisé en permanence dans le cadre d'activités météorologiques courantes. Il permet de mesurer la température à $\pm 0,04$ K (degré de confiance : 95 %). Pour plus ample information, reportez-vous au chapitre 4, partie I.

Il existe quatre grands types de thermomètre météorologique, à savoir :

- Le type à gaine, l'échelle étant gravée sur le tube du thermomètre ;
- Le type à gaine, l'échelle étant gravée sur une plaque de verre opale fixée sur le tube du thermomètre à l'intérieur de la gaine ;
- Le type sans gaine, l'échelle étant gravée sur le tube, fixé sur une monture en métal, en porcelaine ou en bois qui comporte les valeurs ;
- Le type sans gaine, l'échelle étant gravée sur le tube.

Les tubes de certains thermomètres sont dotées d'une loupe pour offrir une image agrandie du fil de mercure.

Les thermomètres de types (a) et (b) présentent un avantage sur les types (c) et (d) : leur graduation est complètement protégée contre l'usure alors qu'il peut s'avérer nécessaire de renoircir de temps à autre les traits des deux derniers types d'instrument, lesquels sont en revanche plus faciles à fabriquer. Les thermomètres des types a) et d) offrent l'avantage de réduire les risques d'erreurs de parallaxe (voir section 2.2.4). Le HMSO propose une description succincte des différents thermomètres utilisés en météorologie (1980).

Quel que soit le type de thermomètre adopté, la gaine ou la monture aura de préférence la plus faible capacité calorifique possible et, par conséquent, ne sera pas inutilement volumineuse, tout en étant suffisamment robuste pour supporter les risques normaux liés à la manipulation et au transport.

Dans le cas des thermomètres à mercure, en particulier les thermomètres à maximum, il est important que le vide au-dessus de la colonne de mercure soit quasi parfait. Il est recommandé que tous les thermomètres comportent une graduation à l'épreuve d'une immersion totale, à l'exception de ceux destinés à mesurer la température du sol. Les caractéristiques techniques des différents thermomètres sont présentées dans les paragraphes suivants.

2.2.1.1 Thermomètre ordinaire (station)

Cet instrument est le plus précis de tous les thermomètres utilisés en météorologie. Il s'agit le plus souvent d'un thermomètre à mercure, avec une graduation de 0,2 ou 0,5 K, l'échelle étant plus longue que celle des autres thermomètres météorologiques.

Le thermomètre ordinaire est utilisé sous abri pour éviter les erreurs dues au rayonnement. Il est fixé sur un support destiné à le maintenir en position verticale, réservoir dirigé vers le bas. Ce dernier est en forme de cylindre ou d'oignon.

2.2 THERMOMÈTRES À LIQUIDE SOUS VERRE

2.2.1 Description générale

On utilise encore les thermomètres à liquide sous verre pour les observations courantes de la température de l'air, notamment les températures maximales, minimales et de bulbe humide. Ce type de thermomètre fait appel au principe de dilatation différentielle entre un liquide pur et son contenant en verre. Le thermomètre est un tube capillaire fin en communication avec le bulbe principal ; le volume de liquide est établi de manière à remplir complètement le bulbe et partiellement le tube sur toute la plage de température à mesurer. Les variations de volume du liquide dans son contenant se traduisent par une variation de hauteur de la colonne de liquide le long du tube. Les graduations de l'échelle de température, obtenues par étalonnage à l'aide d'un thermomètre de référence, peuvent être portées directement sur le tube, ou sur une échelle séparée étroitement fixée au tube.

Le liquide employé dépend du domaine de température à mesurer : le mercure est généralement utilisé pour des températures supérieures à son point de congélation ($-38,3$ °C), tandis que l'alcool éthylique ou autres liquides organiques purs servent à mesurer des températures inférieures à ce seuil. Le verre du thermomètre sera de préférence un verre normal ou un verre borosilicate homologué pour cet usage. La paroi du bulbe en verre sera la plus mince possible, tout en offrant une résistance raisonnable, pour faciliter la conduction de la chaleur. Le déplacement du liquide à l'intérieur du tube sous l'effet d'un changement de température donné est d'autant plus important que le diamètre du tube est petit, ce qui réduit la plage de température utile du thermomètre pour une longueur de tube donné. Il est souhaitable de recuire le verre du thermomètre avant de le graduer afin de réduire au minimum la lente détérioration qu'il subit en vieillissant.

Il est possible de coupler deux thermomètres ordinaires et de s'en servir comme psychromètre, à condition que le bulbe de l'un d'entre eux soit entouré d'un manchon humide³.

2.2.1.2 Thermomètre à maximum

Le modèle recommandé est un thermomètre à mercure dans lequel le tube se rétrécit entre le bulbe et le début de l'échelle, ce qui empêche la colonne de mercure de redescendre lorsque la température baisse. Il est cependant possible de reformer la colonne de mercure en tenant fermement l'instrument et en l'agitant vigoureusement, bulbe vers le bas, jusqu'à obtention de l'effet recherché. Le thermomètre à maximum sera alors monté suivant un angle de 2° par rapport à l'horizontale, bulbe dirigé vers le bas, afin que la colonne de mercure vienne appuyer contre l'étranglement et ne redescende pas sous l'effet de la gravité. Il est indiqué de choisir un tube capillaire qui s'élargit au sommet du tube pour permettre à la colonne de mercure de se reconstituer facilement en cas de fragmentation.

2.2.1.3 Thermomètre à minimum

L'instrument le plus courant est un thermomètre à alcool, doté d'un index en verre foncé d'environ 2 cm de long, immergé dans l'alcool. Étant donné que de l'air subsiste dans le tube de ce type de thermomètre, celui-ci doit être muni à son extrémité supérieure d'une ampoule de sécurité suffisamment grande pour que l'instrument puisse subir sans dommage une température de 50° C. Le thermomètre à minimum est monté de la même manière que le thermomètre à maximum, à savoir en position quasi horizontale. Différents liquides peuvent être utilisés, par exemple l'alcool éthylique, le pentane et le toluène. Il est important que le liquide soit aussi pur que possible car la présence de certaines impuretés augmente la tendance qu'ont les hydrocarbures à se polymériser avec le temps sous l'action de la lumière, polymérisation qui modifie l'étalonnage.

Par exemple, l'alcool éthylique doit être exempt de toute trace d'acétone.

On se sert également des thermomètres à minimum pour mesurer la température minimale sur herbe.

2.2.1.4 Thermomètres dans le sol

On utilise généralement un thermomètre à mercure dont le tube est recourbé à angle droit ou tout autre angle approprié au-dessous du premier trait de graduation pour mesurer la température du sol jusqu'à

20 cm de profondeur. Son réservoir est enfoncé dans le sol à la profondeur voulue et l'échelle de lecture est placée sur le sol.

Ces thermomètres sont à immersion partielle (correspondant à la profondeur de mesure) et sont dotés d'une ampoule de sécurité à l'extrémité du tube laissé à l'air libre pour permettre la dilatation du mercure.

Les mesures de température réalisées à des profondeurs supérieures à 20 cm font appel à des thermomètres à mercure, placés dans des tubes en bois, en verre ou en plastique, dont le réservoir est recouvert de cire ou d'une peinture métallique. L'ensemble thermomètre/tube est ensuite suspendu ou glissé dans un tube fin en métal ou en plastique, enfoui dans le sol à la profondeur requise. Dans les climats froids, il est conseillé de faire dépasser le sommet du tube extérieur du sol d'une hauteur supérieure à l'épaisseur attendue de la couche de neige.

La technique qui consiste à utiliser un tube en acier placé verticalement ne se prête pas à la mesure de la variation diurne de la température du sol, en particulier dans un sol sec. En effet, un tel tube conduit la chaleur de la surface de la terre, ce qui peut induire des erreurs significatives dans le calcul des propriétés thermiques du sol fondé sur de telles mesures.

Ces thermomètres sont dotés d'une grande capacité thermique et donc d'une grande inertie et on peut donc les retirer de leur tube et le lire avant que la température indiquée n'ait eu le temps de varier sensiblement.

Lorsque le sol est recouvert de neige, il est recommandé de construire un pont de circulation parallèle à la rangée de thermomètres afin que l'observateur puisse y accéder sans modifier l'épaisseur de la couche de neige. Ce pont doit être conçu de manière à ce que le tablier puisse être retiré entre les différents relevés afin de ne pas perturber la couverture neigeuse.

2.2.2 Méthodes de mesure

2.2.2.1 Lecture d'un thermomètre ordinaire

Il est conseillé de lire le thermomètre le plus rapidement possible afin d'éviter les variations de température liées à la présence de l'observateur. Le ménisque formé par le liquide, ou l'index, et l'échelle du thermomètre ne situant pas sur le même plan, il faut veiller à éviter les erreurs de parallaxe. Pour ce faire, l'observateur devra s'assurer que la ligne droite entre son œil et le ménisque, ou l'index, est bien perpendiculaire au tube du thermomètre. Les graduations

³ Les températures du thermomètre mouillé sont expliquées au chapitre 4, partie I.

du thermomètre n'étant généralement pas inférieures au cinquième de degré, les lectures au dixième degré le plus proche, essentielles en psychrométrie, doivent être réalisées par estimation. On appliquera éventuellement une correction d'échelle aux valeurs lues. Il est en outre conseillé de lire et régler les thermomètres à maximum et minimum au moins deux fois par jour. Les valeurs relevées devront être comparées à celles obtenues avec un thermomètre ordinaire afin de vérifier qu'elles ne comportent pas d'erreurs graves.

2.2.2.2 Mesure de la température minimale sur herbe

La température minimale sur herbe est la température la plus basse indiquée pendant la nuit par un thermomètre exposé à l'air libre juste au-dessus d'un herbe court. Elle est mesurée par un thermomètre à minimum comme celui décrit dans la section 2.2.1.3. L'instrument est monté sur un support adapté de manière à être incliné suivant un angle d'environ deux degrés par rapport à l'horizontale, le réservoir étant situé plus bas que le tube, à une hauteur comprise entre 25 et 50 mm au-dessus du sol, et en contact avec les pointes de l'herbe. Sur sol enneigé, le thermomètre doit être placé le plus près possible de la surface immédiate de la neige, sans toutefois l'effleurer.

Normalement, le thermomètre est mis en place pour la dernière observation une heure avant le coucher du soleil et le relevé est effectué le lendemain matin. L'instrument est conservé sous abri ou à l'intérieur pendant la journée. Toutefois, dans les stations où aucun observateur n'est en poste au coucher du soleil, il faut parfois laisser le thermomètre exposé toute la journée. Dans ces circonstances, en cas de fort ensoleillement, le liquide organique contenu dans le thermomètre risque de se distiller et de s'accumuler en haut du tube. On peut réduire ce phénomène au minimum en recouvrant l'ampoule de sécurité d'une gaine en métal noir protégée par un manchon de coton, gaine qui absorbe plus de rayons que le thermomètre et atteint donc une température plus élevée que celui-ci. Ainsi, la vapeur susceptible de se former se condensera plus bas dans le capillaire au-dessus de la colonne d'alcool.

2.2.2.3 Mesure de la température dans le sol

Les profondeurs normalisées pour la mesure de la température du sol sont égales à 5, 10, 20, 50 et 100 cm. D'autres valeurs peuvent être envisagées. Le site de mesure est de préférence situé sur une parcelle de sol nu d'environ 75 cm², représentative des surfaces avoisinantes. Si tel n'est pas le cas, la superficie ne doit pas être inférieure à 100 m². Lorsque le sol est recouvert de neige, il est recommandé de mesurer également la température de la couche neigeuse.

Lorsque la neige est peu abondante, on peut la retirer avant de procéder aux relevés puis la remettre en place.

Il convient de préciser le type de sol, la nature du couvert végétal, l'angle et l'orientation de la pente lorsqu'on décrit un site destiné à des mesures de température du sol. Chaque fois que possible, on indiquera les caractéristiques physiques du sol, telles que la densité apparente, la conductivité thermique ou la capacité hygrométrique, mais aussi le niveau de la nappe phréatique (s'il se trouve à moins de cinq mètres de la surface) et la structure du sol.

Pour les stations de météorologie agricole, il est recommandé d'enregistrer en continu les températures du sol et de l'air à différents niveaux de la couche adjacente au sol (de la surface du sol à environ dix mètres au-dessus de la limite supérieure de la végétation dominante).

2.2.3 Implantation et exposition des thermomètres

Le thermomètre ordinaire, comme le thermomètre à maximum ou à minimum, est toujours exposé dans un abri placé sur un support. Les thermomètres destinés à mesurer les températures extrêmes sont montés sur des supports adaptés suivant une inclinaison d'environ deux degrés par rapport à l'horizontale, le réservoir étant situé plus bas que le tube.

L'implantation et l'exposition d'un thermomètre à minimum sur herbe sont précisées dans la section 2.2.2.2. Dans les stations où la neige est persistante et de profondeur variable, il est possible d'utiliser un support permettant de remonter ou d'abaisser le thermomètre afin de le maintenir à la distance voulue au-dessus de la surface de la neige.

2.2.4 Sources d'erreur avec les thermomètres à liquide sous verre

Les principales sources d'erreur communes à tous les thermomètres à liquide sous verre sont les suivantes :

- (a) erreurs d'élasticité ;
- (b) erreurs liées à la partie émergée du tube ;
- (c) erreurs de parallaxe et erreurs grossières de lecture ;
- (d) variations de volume du réservoir dues à la pression extérieure ou intérieure ;
- (e) capillarité ;
- (f) erreurs de graduation et d'étalonnage ;
- (g) dilatation inégale du liquide et du verre sur la plage considérée.

Les trois dernières causes d'erreur peuvent être réduites au minimum par le fabricant et intégrées dans les corrections à appliquer aux valeurs observées. Il

convient d'accorder une attention particulière aux trois premiers types d'erreur. Les erreurs de type (d) ne se produisent habituellement pas lorsque les thermomètres sont utilisés à des fins météorologiques.

2.2.4.1 Erreurs d'élasticité

Il existe deux types d'erreurs d'élasticité, à savoir réversible et irréversible. La première n'a d'importance que lorsque le thermomètre est exposé à une grande amplitude thermique sur une courte durée. Ainsi, si l'on vérifie le thermomètre au point de vapeur et peu après au point de congélation, il donnera une mesure tout d'abord trop basse, puis la température indiquée s'élèvera progressivement jusqu'à la valeur correcte. Cette erreur dépend de la qualité du verre employé et peut atteindre 1 K (avec un verre de très haute qualité, elle ne devrait pas dépasser 0,03 K) et pourrait être proportionnellement moindre pour une plage de température plus restreinte. L'effet est négligeable dans les mesures météorologiques, sauf en cas d'éventuelle erreur dans l'étalonnage initial.

Les changements irréversibles peuvent avoir une importance plus grande. Le réservoir du thermomètre tend à se contracter lentement au fil des ans et entraîner ainsi une élévation du zéro. Le changement le plus important intervient la première année, puis la dégradation ralentit progressivement. Ce phénomène peut être atténué en soumettant le réservoir à un traitement thermique et en utilisant le verre le mieux adapté. Même avec un verre de très haute qualité, la variation peut au début atteindre environ 0,01 K par an. Pour garantir l'exactitude de la mesure, en particulier pour les thermomètres d'inspection ou de vérification, il est recommandé de redéfinir le zéro à intervalles réguliers et d'apporter les corrections nécessaires.

2.2.4.2 Erreurs liées à la partie émergée du tube

Le thermomètre qui sert à mesurer la température de l'air est généralement environné d'air à température à peu près uniforme. Il est étalonné soit par immersion totale, soit par immersion partielle (jusqu'au sommet de la colonne de mercure). Utiliser ce type de thermomètre pour déterminer la température d'un milieu autre que celui qui environne le tube, de sorte que la température réelle du tube est différente de celle du réservoir, est source d'erreur.

Dans les applications météorologiques, le cas le plus probable dans lequel ce type de situation risque de se produire est celui de la vérification de l'étalonnage d'un thermomètre ordinaire dans un récipient contenant un autre liquide à une température sensiblement différente de la température ambiante, alors que seul le réservoir ou la partie inférieure du tube sont immersés.

2.2.4.3 Erreurs de parallaxe et erreurs grossières de lecture

Si l'observateur ne se place pas sur un plan perpendiculaire au tube du thermomètre, il s'expose à une erreur de parallaxe. L'erreur augmente avec l'épaisseur du verre du tube et l'angle d'observation par rapport à la ligne de vision correcte. Il importe donc d'apporter le plus grand soin à cette opération afin d'éviter ce type d'erreur. Avec un thermomètre à mercure suspendu verticalement, comme c'est le cas dans un abri ordinaire, le thermomètre doit être lu à l'horizontale du sommet de la colonne de mercure.

Des erreurs peuvent également se produire lorsque l'observateur, d'une manière ou d'une autre, perturbe l'environnement en s'approchant pour procéder à la lecture du thermomètre. Il est donc nécessaire qu'il effectue sa lecture au plus proche dixième de degré le plus rapidement possible. Les erreurs grossières de lecture sont généralement de l'ordre de 1, 5 ou 10°. De telles erreurs peuvent être évitées en procédant à une nouvelle vérification du chiffre des dizaines et des unités après une première lecture.

2.2.4.4 Erreurs liées à la dilatation différentielle

Le coefficient de dilatation cubique du mercure est de $1,82 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, et celui de la plupart des verres se situe entre $1,0 \times 10^{-5}$ et $3,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Le coefficient de dilatation du verre représente donc une fraction importante de celui du mercure et il ne peut pas être négligé. Étant donné que ni les coefficients de dilatation cubique du mercure et du verre ni la surface de la section interne du tube ne sont strictement constants sur la plage de température et sur la longueur du tube, la valeur scalaire de la longueur unitaire du tube varie le long de celle-ci et le thermomètre doit être étalonné par rapport à un thermomètre étalon par le fabricant avant de pouvoir être utilisé.

2.2.4.5 Erreurs liées aux thermomètres à alcool.

Le coefficient de dilatation des liquides utilisés dans les thermomètres à alcool est beaucoup plus élevé que celui du mercure et leur point de congélation nettement plus bas (l'alcool éthylique gèle à -115°C). On utilise l'alcool dans les thermomètres à minimum car il est incolore et son coefficient de dilatation plus élevé permet d'adopter un tube plus grand. À prix et à qualité égale, les thermomètres à alcool sont moins précis que les thermomètres à mercure. Outre les défauts généraux des thermomètres à liquide, les thermomètres à alcool présentent certains défauts qui leur sont propres :

- (a) Adhérence du liquide au verre : contrairement au mercure, les liquides organiques mouillent en général le verre. En conséquence, lorsque la température chute brusquement, une certaine quantité de liquide reste sur les parois du tube,

- donnant une température inférieure lors de la lecture. Lorsque le thermomètre est suspendu verticalement, le liquide redescend petit à petit le long du tube ;
- (b) Fragmentation de la colonne de liquide. Souvent, des gouttelettes de liquide se forment dans la partie supérieure du tube du thermomètre, par évaporation et condensation. On peut corriger cette fragmentation mais des erreurs peuvent se produire au début du processus, avant que l'on s'aperçoive du phénomène. La fragmentation de la colonne se produit souvent pendant le transport. On limite cette erreur lors du processus de fabrication en scellant le thermomètre à sa température la plus basse afin que le tube contienne un maximum d'air ;
- (c) Lentes modifications du liquide. Les liquides organiques employés ont tendance à se polymériser avec l'âge et l'exposition à la lumière, ce qui entraîne graduellement une diminution du volume de liquide. Cet effet est accéléré par la présence d'impuretés ; on a notamment remarqué que la présence d'acétone dans l'alcool éthylique avait un effet très délétère. Il convient donc d'apporter le plus grand soin à la préparation des liquides destinés aux thermomètres. Cet effet peut également être accentué si des colorants sont utilisés pour rendre le liquide plus visible.

La réduction de l'erreur due à la fragmentation de la colonne de liquide et l'entretien général des thermomètres à liquide organique sont traités plus tard dans ce chapitre.

2.2.5 Comparaison et étalonnage en laboratoire et sur le terrain

2.2.5.1 Étalonnage en laboratoire

L'étalonnage des thermomètres est confié à des organismes nationaux d'essai ou des laboratoires d'essais agréés. Pour les thermomètres à liquide, on utilise un bain de liquide susceptible de maintenir la température à la valeur souhaitée dans la plage requise. De préférence, le coefficient de variation de la température ne devra pas excéder les limites recommandées et l'appareil d'étalonnage devra être équipé d'un dispositif destiné à agiter le liquide. Les thermomètres de référence et les thermomètres testés seront suspendus dans le récipient sans en toucher les parois, et totalement immergés.

Il est recommandé de procéder à un nombre suffisant de mesures pour s'assurer que les corrections à appliquer représentent les performances du thermomètre dans des conditions normales d'utilisation,

les erreurs d'interpolation à tout point intermédiaire ne dépassant pas les erreurs non systématiques (voir chapitre 4, partie III).

2.2.5.2 Vérification et étalonnage sur le terrain

Tous les thermomètres à liquide subissent une modification progressive du zéro. Il est donc recommandé de les vérifier régulièrement, généralement tous les deux ans, et de les stocker en position verticale à température ambiante au moins 24 h avant le début de la vérification.

Le point de glace peut être contrôlé en remplissant presque entièrement un vase de Dewar de glace pilée obtenue à partir d'eau distillée et en la mouillant avec de l'eau distillée. L'espace entre les morceaux de glace et le fond du récipient doit être exempt d'air. L'eau doit se maintenir à deux centimètres en-dessous de la surface de la glace. Une bouteille Thermos ordinaire permet l'immersion totale de la plupart des thermomètres jusqu'à leur point de glace. Le thermomètre doit être placé de manière à ce que la colonne de mercure ou d'alcool émerge le moins possible de la glace. Un laps de temps d'au moins 15 min doit s'écouler avant d'effectuer une lecture de la température pour permettre au thermomètre d'absorber la température de la glace fondante. Il est conseillé d'agiter chaque thermomètre plongé dans le mélange d'avant en arrière puis de le lire immédiatement au dixième de la graduation. Des lectures successives seront effectuées toutes les cinq minutes afin de calculer une valeur moyenne.

Les autres points de la plage de température peuvent être couverts par référence à un éalon itinérant ou un thermomètre d'inspection. La comparaison peut s'effectuer en immergeant le thermomètre de référence et le ou les thermomètres à vérifier dans un récipient profond rempli d'eau. Il est généralement préférable de travailler à l'intérieur, surtout par temps ensoleillé. Les résultats seront en outre meilleurs si l'eau est à température ambiante ou proche de celle-ci.

Chaque thermomètre est comparé au thermomètre de référence et des thermomètres de même type peuvent être comparés entre eux. Pour chaque comparaison, il convient d'agiter les deux thermomètres d'avant en arrière dans l'eau pendant une minute environ, tout en maintenant leurs réservoirs proches l'un de l'autre, avant de les lire. Il doit être possible de lire les thermomètres sans en changer la profondeur d'immersion ; les réservoirs devant être immergés le plus profondément possible. La plupart des thermomètres utilisés en météorologie sont étalonnés pour une immersion totale ; toutefois, si la différence entre la température de l'air et celle de l'eau ne dépasse pas 5 K, la correction pour la partie émergée

du tube est négligeable. Souvent, alors que les réservoirs se situent à la même profondeur, la partie supérieure de la colonne de mercure (ou autre liquide) du thermomètre de référence et celle du thermomètre à vérifier peuvent s'éloigner l'une de l'autre. Il faut alors éviter les erreurs de parallaxe.

Il est conseillé de répéter cette opération au moins trois fois pour chaque paire de thermomètres. Pour chaque série de comparaisons, l'écart moyen entre les lectures ne doit pas dépasser les tolérances indiquées au tableau de la section 2.1.3.2.

Les thermomètres dans le sol peuvent être testés de la même manière, mais ils devront séjourner dans l'eau au moins 30 min afin de laisser à la cire qui entoure le réservoir le temps de s'adapter à la température de l'eau. Étant donné la grande inertie de ce type de thermomètre, il est difficile d'obtenir un résultat satisfaisant à moins de pouvoir stabiliser la température de l'eau. Si la vérification s'effectue dans une eau dont la température ne varie pas plus de 1 K sur 30 min, la différence par rapport à la valeur corrigée du thermomètre de référence ne doit pas dépasser 0,25 K.

2.2.6 Corrections

En sortie de fabrication, tout thermomètre repéré par un numéro de série s'accompagne a) d'un certificat daté confirmant qu'il satisfait aux exigences d'incertitude ou b) d'un certificat d'étalonnage également daté, indiquant les corrections à appliquer aux lectures pour obtenir l'incertitude requise.

De manière générale, si les erreurs en des points donnés de l'échelle d'un thermomètre (0°, 10°, 20 °C par exemple) sont toutes inférieures à $\pm 0,05$ K, il ne sera pas nécessaire d'appliquer une correction et les thermomètres pourront être utilisés directement, comme thermomètres ordinaires, dans des abris à ventilation naturelle, ou comme thermomètres à maximum ou à minimum, ou thermomètres destinés à mesurer la température minimale sur herbe ou du sol. Mais en cas d'erreurs supérieures à 0,05 K, l'observateur devra disposer sur place d'une table de correction accompagnée d'instructions claires quant à son application.

Les thermomètres pour lesquels un certificat est normalement délivré sont les suivants :

- (a) Thermomètres utilisés dans des psychromètres à ventilation ;
- (b) Thermomètres utilisés par les inspecteurs comme étalons itinérants ;
- (c) Thermomètres de référence pour l'étalonnage en laboratoire ;
- (d) Thermomètres à usage spécial justifiant l'application de corrections.

Les thermomètres employés en psychométrie doivent être identiques.

2.2.7 Maintenance

2.2.7.1 Fragmentation de la colonne de liquide

Le défaut le plus couramment rencontré est la fragmentation de la colonne de liquide, laquelle intervient surtout pendant le transport. Ce risque concerne plus particulièrement les thermomètres à alcool. Les autres problèmes observés avec ce type de thermomètre sont l'adhérence du liquide au verre et la formation de gouttelettes d'alcool par distillation au niveau du support du tube.

On peut généralement reconstituer la colonne de liquide fragmentée en tapotant sur le thermomètre, réservoir orienté vers le bas, avec les doigts ou tout autre objet relativement souple. Cette opération peut durer un certain temps (cinq minutes si nécessaire). Il est recommandé de suspendre ensuite le thermomètre ou de le maintenir en position verticale dans un contenant approprié, réservoir en bas, pendant au moins une heure pour que le liquide organique susceptible d'adhérer encore à la paroi de verre puisse redescendre jusqu'à rejoindre la colonne principale. En cas d'échec, on peut adopter une méthode plus radicale pour parvenir à cette fin, à savoir la méthode par distillation destinée à refroidir le réservoir dans un mélange de glace et de sel, porté au point de congélation, tout en protégeant la partie supérieure du tube contre le froid. Une autre solution consiste à placer le réservoir du thermomètre, maintenu verticalement, dans un récipient d'eau chaude, et à tapoter ou agiter le tube de temps à autre, puis à le retirer dès lors que la partie supérieure de la colonne de liquide organique atteint l'ampoule de sécurité au sommet du tube. Cette opération doit faire l'objet de la plus grande attention en raison du risque d'éclatement du thermomètre suite à la dilatation du liquide dans l'ampoule de sécurité.

2.2.7.2 Échelle illisible

L'un des autres inconvénients que peuvent présenter les thermomètres à liquide sous verre de type sans gaine est l'effacement progressif des graduations. Ce problème peut être réglé sur place en frottant l'échelle avec un crayon cire de couleur foncée ou un crayon noir à mine de plomb.

2.2.8 Sécurité

Le mercure, liquide le plus couramment employé dans les thermomètres à liquide sous verre, est toxique en cas d'ingestion ou d'inhalation. Si on

le casse, il convient de récupérer les gouttelettes de mercure, lesquelles présentent sinon un danger pour la santé, en particulier dans un espace confiné (voir les conseils de nettoyage à la section 3.2, chapitre 3, partie I, consacrée aux baromètres à mercure). Le transport de thermomètres à mercure sur les aéronefs peut également soumis à certaines restrictions ou exiger certaines précautions visant à éviter toute fuite de mercure en cas de bris. Il est recommandé de s'adresser aux autorités compétentes ou au transporteur pour avis.

2.3 THERMOGRAPHES MÉCANIQUES

2.3.1 Caractéristiques générales

Les instruments qui sont encore le plus fréquemment utilisés sont des thermographes mécaniques à bilame ou à tube de Bourdon, car ils présentent l'avantage d'être portatifs, fiables et relativement peu coûteux. Toutefois, ils ne sont pas facilement adaptables aux enregistrements électroniques ou à distance. Ces instruments comprennent un mécanisme rotatif actionnant un tambour recouvert d'un papier grappe, mécanisme commun à tous les enregistreurs classiques. En général, les thermographes fonctionnent sur une plage d'environ 60 K, ou même 80 K s'ils sont utilisés dans des climats continentaux. Il faut pouvoir disposer d'une valeur d'échelle suffisante pour lire sans difficulté la température avec une exactitude de 0,2 K sur un diagramme de format courant. À ces fins, il convient de prévoir un moyen permettant de changer le réglage du zéro de l'instrument selon la saison. L'erreur maximale d'un thermographe ne doit pas excéder 1 K.

2.3.1.1 Thermographe à bilame

Dans cet instrument, le mouvement du style inscripteur est commandé par le changement de courbure d'un bilame plan ou hélicoïdal, dont une extrémité est fixée rigidement à un bras assujetti au cadre. Il est recommandé de prévoir un moyen d'ajustement très précis de ce bras pour pouvoir modifier au besoin la position du zéro de l'instrument, ainsi qu'un dispositif permettant de changer la valeur d'échelle par l'ajustement du levier destiné à transmettre au style le mouvement du bilame. Il est conseillé de laisser le soin de procéder à ce dernier ajustement à un personnel qualifié. L'élément bimétallique sera protégé contre la corrosion, de préférence par un revêtement épais de cuivre, de nickel ou de chrome, encore qu'une couche de laque puisse suffire sous certains climats. L'instrument possède ordinairement une inertie de 25 s environ pour une vitesse de l'air égale à 5 m s⁻¹.

2.3.1.2 Thermographe à tube de Bourbon

Cet instrument, de par sa conception générale, se rapproche beaucoup de celle du thermographe à bilame, mais son capteur présente la forme d'un tube métallique courbe, de section elliptique aplatie, rempli d'alcool. Le tube de Bourdon est moins sensible que l'élément bimétallique, de sorte qu'il faut habituellement lui adjoindre un mécanisme amplificateur à levier pour obtenir une valeur d'échelle suffisante. L'instrument possède ordinairement une inertie de 60 s environ pour une vitesse de l'air égale à 5 m s⁻¹.

2.3.2 Méthodes de mesure

Afin d'améliorer la résolution des relevés, on pourra, selon la saison, régler le thermographe sur l'une des deux plages de mesure disponibles et le diagramme qui lui correspond. La date exacte du passage d'un jeu de diagrammes à l'autre dépendra du lieu. Toutefois, au moment du changement, il conviendra de régler l'instrument. Il est recommandé de procéder à cette opération soit sous abri par temps couvert et venté, à une heure où la température est pratiquement constante, soit dans un local où règne une température constante. On procède en desserrant la vis qui relie le bras du style à son axe pour placer ledit bras dans la bonne position puis en la resserrant. On peut ensuite laisser l'instrument en l'état avant de procéder à une nouvelle vérification et d'éventuels ajustements.

2.3.3 Exposition et implantation

Il est conseillé d'exposer ces instruments dans un abri pour thermomètres de grande dimension.

2.3.4 Sources d'erreur

La principale source d'erreur au niveau du mécanisme même du thermographe est la friction. Elle peut s'expliquer par un mauvais alignement du bilame hélicoïdal par rapport à l'axe. À défaut d'être positionné avec précision, ce bilame agit comme un ressort puissant, lequel, s'il est fixé de manière rigide, vient plaquer l'axe sur un côté des paliers. Avec les instruments modernes, ceci n'est pas un problème majeur. La friction entre le style et le diagramme peut être réduite au minimum ajustant correctement la suspension de la charnière.

2.3.5 Comparaison et étalonnage

2.3.5.1 Étalonnage en laboratoire

Il existe deux grandes méthodes pour étalonner les thermographes à bilame en laboratoire. La première

consiste à fixer l'instrument de manière à ce que l'élément bimétallique soit immergé dans un bain d'eau. La seconde vise à placer le thermographe dans une chambre d'étalonnage disponible dans le commerce dotée d'un thermostat pour contrôler la température de l'air, d'un ventilateur et d'un thermomètre de référence.

Il est conseillé d'effectuer des comparaisons à deux températures différentes, ce qui permettra de déterminer les éventuelles corrections à apporter au zéro et à l'amplification. Les ajustements seront réalisés de préférence par un personnel agréé, lequel devra se référer au manuel du fabricant.

2.3.5.2 Comparaison sur le terrain

Le coefficient d'inertie de cet instrument peut être de moitié inférieur à celui d'un thermomètre ordinaire à mercure, de sorte qu'une comparaison régulière des lectures du thermomètre sec et du thermographe réalisée à heures fixes, ne produira généralement pas des résultats concordants exactement, même si l'instrument fonctionne parfaitement. Il est préférable de vérifier la lecture de l'instrument un jour favorable, à une heure où la température est quasiment constante (à savoir par temps venté et nuageux), ou de ne comparer que les minima sur le diagramme du thermographe placé dans le même abri. On peut ensuite procéder à tout éventuel ajustement à l'aide de la vis de fixation.

2.3.6 Corrections

Les thermographes ne sont généralement pas accompagnés d'un certificat de correction. Si les vérifications à la station indiquent que l'instrument présente des erreurs excessives, lesquelles ne peuvent pas être rectifiées sur place, il est conseillé de renvoyer l'instrument à un laboratoire d'étalonnage compétent pour y être réparé et réétalonné.

2.3.7 Maintenance

La maintenance de routine comprendra un contrôle externe de l'état général de l'instrument, une vérification du jeu des paliers, de l'inclinaison du bras enregistreur, de la fixation du style, de l'angle entre le bras amplificateur et le bras enregistreur, ainsi qu'une vérification de la synchronisation diagramme/tambour. Ces examens seront réalisés conformément aux recommandations du fabricant. De manière générale, il est recommandé de manipuler avec soin le bilame hélicoïdal afin d'éviter tout dommage mécanique et de veiller à sa propreté. Le palier de l'axe devra également être maintenu propre et graissé à intervalles réguliers avec un peu d'huile d'horlogerie. L'instrument est très simple d'un point

de vue mécanique et devrait fonctionner de manière satisfaisante si les mesures appropriées ont été prises pour éviter toute friction importante et tout risque de corrosion.

2.4

THERMOMÈTRES ÉLECTRIQUES

2.4.1

Caractéristiques générales

Les instruments électriques sont désormais largement utilisés en météorologie pour mesurer les températures. Ces instruments ont le principal avantage de fournir un signal de sortie approprié pour l'indication, l'enregistrement, le stockage ou la transmission à distance des données de température. Les capteurs les plus courants sont les résistances électriques, les thermomètres à semi-conducteurs (thermistance) et les thermocouples.

2.4.1.1 Thermomètre à résistance électrique

On peut mesurer la résistance électrique d'un matériau dont on connaît la résistance en fonction de sa température pour traduire la température.

Pour une variation faible de la température, l'augmentation de la résistance des métaux purs est proportionnelle à ladite variation, voir équation 2.2 :

$$R_T = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (2.2)$$

dans laquelle $(T - T_0)$ a une valeur faible ; R_T est la résistance d'une quantité fixe de métal à la température T ; R_0 est la résistance du métal à la température de référence T_0 , et α est le coefficient thermique de résistance au voisinage de T_0 .

Si la température de référence est de 0°, l'équation 2.2 s'écrit :

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot t) \quad (2.3)$$

Lorsque les variations de température sont plus élevées et que certains alliages de métaux sont utilisés, l'équation 2.4 exprime cette relation avec plus de précision :

$$R_T = R_0 [1 + \alpha (T - T_0) + \beta (T - T_0)^2] \quad (2.4)$$

Si la température de référence est de 0°, l'équation 2.4 s'écrit :

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2) \quad (2.5)$$

Ces équations donnent la variation proportionnelle de résistance d'un thermomètre réel, de sorte que la valeur des coefficients α et β peut être obtenue par

étalonnage du thermomètre utilisé. À partir de ces résultats, on peut déterminer la fonction inverse, à savoir t fonction de R . Une telle fonction peut s'exprimer sous la forme d'une série polynômiale de $(R_0 - R_T)$, à savoir $t = t(R_0 - R_T) = c_1(R_0 - R_T) + c_2(R_0 - R_T)^2 + \dots$.

Un thermomètre à résistance métallique de bonne qualité satisfait aux exigences suivantes :

- (a) Ses propriétés physiques et chimiques doivent rester stables sur toute la plage de mesure ;
- (b) Sa résistance doit augmenter de façon constante à mesure que la température augmente sans discontinuité dans la plage de mesure ;
- (c) Des facteurs externes, telles que l'humidité, la corrosion ou les déformations physiques, ne doivent pas modifier significativement sa résistance ;
- (d) Sa résistivité doit demeurer constante sur une période d'au moins deux ans
- (e) sa résistivité et son coefficient thermique de résistivité doivent être suffisamment élevés pour être utiles dans un circuit de mesure.

Le platine pur est le métal qui satisfait le mieux aux conditions ci-dessus. C'est pourquoi il sert à fabriquer les résistances des thermomètres utilisés comme étalons primaires pour le transfert de l'EIT 1990 entre différents lieux d'observation. Les thermomètres à résistance de platine sont également utilisés comme étalons secondaires ou capteurs opérationnels.

Les thermomètres destinés à un usage pratique en météorologie font l'objet d'un vieillissement artificiel avant de servir et leurs résistances sont le plus souvent en alliages à base de platine, en nickel, en cuivre ou, parfois, en tungstène. Généralement ils sont hermétiquement scellés dans une gaine en céramique. Leur inertie est inférieure à celle des thermomètres à liquide sous verre.

2.4.1.2 Thermomètres à semi-conducteurs

Un autre type de résistance couramment utilisé est la thermistance. Il s'agit d'un semi-conducteur caractérisé par un coefficient de température de la résistance relativement élevé, qui peut être positif ou négatif selon la nature du matériau utilisé. Les mélanges d'oxydes métalliques frittés sont appropriés pour la fabrication de thermistances, qui prennent habituellement la forme de disques, de tiges ou de sphères de petites dimensions souvent enrobés de verre. L'équation 2.6 donne la relation générale entre la température et la résistance (R) d'une thermistance :

$$R = a \exp(b/T) \quad (2.6)$$

dans laquelle a et b sont des constantes et T la température de la thermistance en kelvins.

Pour la mesure des températures, les thermistances offrent les avantages suivants :

- (a) Étant donné la valeur élevée du coefficient thermique des résistances, la tension appliquée à un pont de résistances peut être réduite sans que la sensibilité de ce pont ne diminue. Il n'est donc pratiquement pas, voire pas du tout nécessaire de tenir compte de la valeur de la résistance des conducteurs et de ses variations ;
- (b) Les éléments peuvent être miniaturisés et leur très faible capacité thermique permet ainsi d'obtenir un faible coefficient d'inertie. Toutefois, ces thermistances présentent un inconvénient : pour un taux de dissipation donné, l'effet d'échauffement est plus important qu'avec de gros thermomètres. Il convient donc de maintenir la dissipation de puissance à un faible niveau.

Une thermistance type possède une résistance qui varie d'un facteur 100 ou 200 sur la plage de température comprise entre -40 et +40 °C.

2.4.1.3 Thermocouples

En 1821, Seebeck découvre qu'au point contact de deux métaux différents se produit une très petite force électromotrice de contact. Dans le cas d'un circuit simple composé de deux métaux ayant la même température au point de jonction, aucune force électromotrice n'en résulte dans le circuit car les deux forces électromotrices, une à chaque jonction, s'opposent exactement pour s'annuler. Si la température de l'une des jonctions est modifiée, les deux forces ne sont plus en équilibre et une force électromotrice nette apparaît alors dans le circuit, faisant circuler un courant. En cas de jonctions multiples, la force électromotrice résultante est la somme algébrique des différentes forces électromotrices. La grandeur et le signe de la force électromotrice de contact provoquée à l'une quelconque des jonctions dépend du type des métaux en contact et de la température du point de jonction et peut être représentée de manière empirique pour deux métaux quelconques par l'expression suivante :

$$(E_T - E_s) = \alpha(T - T_s) + \beta(T - T_s)^2 \quad (2.7)$$

dans laquelle E_T est la force électromotrice de contact à la température T et E_s est la force électromotrice à la température de référence T_s , α et β étant des constantes. Lorsqu'il y a deux jonctions dont les températures s'écrivent T_1 et T_2 , la force électromotrice nette E_n (force électromotrice thermique) est donnée par $(E_1 - E_2)$, E_1 étant la force électromotrice à la température T_1 et E_2 la force électromotrice de contact à la température T_2 . On peut également être représentée avec une bonne approximation par une formule quadratique du type indiqué pour $(E_T - E_s)$:

$$E_n = E_1 - E_2 \quad (2.8)$$

$$E_n = a(T_1 - T_2) + b(T_1 - T_2)^2 \quad (2.9)$$

dans laquelle a et b sont des constantes correspondant aux deux métaux utilisés. Dans la plupart des applications météorologiques, on peut négliger la valeur de b , qui est toujours faible par rapport à a .

Les thermocouples sont fabriqués en soudant ou en brasant des fils de métaux différents. Ces jonctions peuvent être très petites et ainsi être dotées d'une capacité thermique négligeable.

Dans les mesures de température, on mesure la force électromotrice induite lorsqu'une jonction est maintenue à une température de référence connue et que l'autre jonction prend la température que l'on cherche à connaître. Cette force électromotrice peut être directement rapportée à la différence de température entre les deux jonctions par un étalonnage préalable du système, ce qui permet de trouver la température inconnue en ajoutant algébriquement cette différence à la température de référence connue.

En météorologie, les thermocouples sont essentiellement utilisés dans le cadre de recherches spécialisées exigeant l'emploi de thermomètres à constante de temps très faible, de l'ordre d'une à deux secondes, dont les valeurs peuvent être lues et enregistrées à distance. Cet instrument présente un désavantage lorsqu'il s'agit de mesurer la température absolue : en effet il faut disposer d'une enceinte à température constante pour la jonction froide et d'un appareil auxiliaire pour mesurer la force électromotrice produite. Les thermocouples sont mieux adaptés aux mesures de températures différentielles, pour lesquelles on ne rencontre pas ce type de complication. On peut obtenir une très bonne exactitude avec un appareil suffisamment sensible, mais celui-ci doit être fréquemment étalonné. Les combinaisons cuivre-constantan ou fer-constantan sont bien adaptées aux mesures météorologiques, car la force électromotrice produite par degré Celsius est supérieure à celle des métaux plus rares et plus coûteux généralement employés à hautes températures.

2.4.2 Méthodes de mesure

2.4.2.1 Résistances électriques et thermistances

Les thermomètres à résistance électrique et à thermistance peuvent être raccordés à divers circuits électriques de mesure, dont beaucoup sont des variantes des circuits en pont de résistances, équilibré ou déséquilibré. Dans le cas du pont à l'équilibre, un potentiomètre de précision est ajusté jusqu'à ce que le courant n'arrive plus à l'indicateur, la position du

tube du potentiomètre étant liée à la température. Dans le cas d'un pont hors équilibre, on peut mesurer le courant résultant du déséquilibre à l'aide d'un galvanomètre. Ce courant ne dépend toutefois pas uniquement de la température, mais il est aussi fonction d'un certain nombre d'autres facteurs. La solution pour éviter une telle situation est de faire appel à une source constante de courant pour alimenter le pont et mesurer la tension résultant du déséquilibre pour connaître la température.

Dans le cas d'une mesure à distance, il convient de tenir compte du fait que le fil reliant le thermomètre à résistance au pont forme également une résistance qui varie avec la température. Il convient de prendre les précautions nécessaires pour éviter ce type d'erreur.

On peut faire appel à un voltmètre numérique couplé à une source constante de courant pour mesurer la chute de tension liée à la température dans l'élément thermométrique, la sortie étant directement transposée en température. La sortie numérique peut être enregistrée ou transmise sans perte d'exactitude à des fins ultérieures. Par la suite, cette sortie numérique peut éventuellement être convertie de nouveau sous forme analogique, pour alimenter un appareil enregistreur par exemple.

2.4.2.2 Thermocouples

Il existe essentiellement deux méthodes pour mesurer la force électromotrice produite par les thermocouples, à savoir :

- Mesurer le courant produit dans le circuit à l'aide d'un galvanomètre sensible ;
- Équilibrer la force électromotrice thermoélectrique au moyen d'une force électromotrice connue, de sorte qu'aucun courant ne circule dans les thermocouples eux-mêmes.

Selon la méthode (a), le galvanomètre est directement raccordé en série aux deux jonctions. La méthode (b) est généralement utilisée si la marge d'erreur requise est inférieure à 0,5 %. Cette procédure ne dépend pas de l'amplitude ni des variations de la résistance de ligne étant donné qu'aucun courant ne circule en cas d'équilibre.

2.4.3 Exposition et implantation

Les exigences d'exposition et d'implantation des thermomètres électriques sont en général les mêmes que celles des thermomètres à liquide sous verre (voir section 2.2.3), avec toutefois des exceptions, et notamment :

- Mesure des valeurs extrêmes : il n'est plus forcément nécessaire de disposer de thermomètres séparés pour les maxima et les minima si le

- thermomètre électrique est relié à un système d'enregistrement en continu des données ;
- (b) Mesure des températures en surface : les propriétés radiatives des thermomètres électriques sont différentes de celles des thermomètres à liquide sous verre. Les thermomètres électriques exposés pour la mesure de la température minimale sur herbe (ou autre mesure en surface) donneront donc des valeurs différentes de celles données par les thermomètres classiques exposés de manière analogue. Ces différences peuvent être réduites en plaçant le thermomètre électrique dans une gaine en verre ;
- (c) Mesure des températures du sol : Les thermomètres à mercure placés dans des tubes d'acier placés verticalement sont relativement peu adaptés pour mesurer la variation diurne de la température du sol car ces derniers conduisent la chaleur présente en surface. On peut obtenir des mesures beaucoup plus représentatives en installant des thermomètres électriques dans des prises de laiton insérées à la profondeur requise dans la paroi verticale non perturbée d'une tranchée que l'on aura creusée. Les connexions électriques sous tube de plastique sont passées par la tranchée qui est ensuite rebouchée de manière à remettre en place, dans la mesure du possible, les couches de drainage d'origine et à en restaurer les caractéristiques.

2.4.4 Sources d'erreur

2.4.4.1 Résistances électriques et thermistances

Lorsque la température est mesurée à l'aide de thermomètres à résistance électrique, les principales sources d'erreur sont les suivantes :

- (a) échauffement de l'élément thermométrique ;
- (b) mauvaise compensation de la résistance des câbles de raccordement ;
- (c) mauvaise compensation des non-linéarités du capteur ou de l'instrument de traitement ;
- (d) brusques variations de la résistance des contacteurs.

L'échauffement est dû à la chaleur produite par le passage du courant dans la résistance, la température de l'élément thermométrique devenant supérieure à celle du milieu environnant.

La résistance des câbles de raccordement introduit une erreur dans la lecture de la température. Cette erreur augmente avec la longueur du câble, par exemple lorsque le thermomètre à résistance est placé à une certaine distance de l'instrument de mesure. Les erreurs de lecture variant également avec les variations de température des câbles. Ces erreurs peuvent être compensées en utilisant des conduc-

teurs supplémentaires, des résistances stabilisatrices et un réseau en pont adapté.

Ni le thermomètre à résistance électrique, ni la thermistance ne se comportent de manière linéaire sur une plage étendue de température ; mais ils peuvent s'approcher d'une grandeur de sortie linéaire sur une plage limitée. Il faut donc prévoir de compenser ces non-linéarités, en particulier si l'on utilise des thermistances, pour obtenir une plage de mesure exploitable en météorologie.

De brusques variations de la résistance des contacteurs peuvent intervenir avec le temps. Ces dernières peuvent être d'ampleur variable et n'être détectées qu'au cours de contrôles de routine de l'étalonnage du système (voir section 2.4.5).

2.4.4.2 Thermocouples

Lorsque la température est mesurée à l'aide de thermocouples, les principales sources d'erreur de mesure sont les suivantes :

- (a) Variations de la résistance des câbles de raccordement avec la température. On peut minimiser cet effet en utilisant des câbles bien isolés aussi courts et compacts que possible ;
- (b) Conduction le long des câbles qui partent de la jonction lorsque le gradient de température se situe au voisinage du point de mesure de la température ;
- (c) Forces électromotrices thermiques secondaires parasites dues à l'utilisation de métaux différents de ceux du thermocouple dans le circuit de connexion. Les différences de température dans le reste du circuit doivent être maintenues aussi faibles que possible. Ceci est particulièrement important lorsque les forces électromotrices à mesurer sont faibles (il convient pour cela de procéder périodiquement à des réétalonnages) ;
- (d) Courants de fuite provenant des circuits électriques adjacents. Leur effet peut être minimisé par un blindage approprié des câbles ;
- (e) Courants galvaniques produits lorsque des câbles ou des jonctions sont exposés à l'humidité ;
- (f) Variations de température dans le galvanomètre qui en modifie les caractéristiques techniques (essentiellement en modifiant la résistance). Cela n'affectera pas les relevés par la méthode potentiométrique, mais ceux des instruments à lecture directe. On peut en minimiser les effets en maintenant la température du galvanomètre aussi proche que possible de la valeur d'étalonnage ;
- (g) erreurs de mesure potentiométrique de la force électromotrice provoquées par des variations de la force électromotrice de la cellule de référence en fonction de laquelle le courant du

potentiomètre a été étalonné et des variations de courant alimentant le potentiomètre entre les différents réglages. Ces erreurs sont généralement peu importantes à condition que la cellule de référence ait été traitée correctement et que le courant du potentiomètre ait été réglé juste avant de mesurer la température.

Les erreurs (a) et (f) font ressortir la supériorité de la méthode potentiométrique lorsqu'un degré élevé d'exactitude est exigé.

2.4.5 Comparaison et étalonnage

2.4.5.1 Résistances électriques et thermistances

Les techniques et méthodes de base utilisées pour l'étalonnage en laboratoire et la vérification sur le terrain des thermomètres électriques sont les mêmes que pour les thermomètres à liquide sous verre (voir section 2.2.5). Toutefois, il n'est en général pas possible de rentrer les thermomètres à résistance à l'intérieur étant donné que les vérifications doivent également porter sur les câbles électriques habituellement utilisés pour leur alimentation. Celles-ci devront donc être réalisées sur des thermomètres sous abri. Il peut s'avérer difficile de réaliser des mesures comparatives de température précises en utilisant un thermomètre électrique et un thermomètre de référence à mercure ou un thermomètre à résistance à affichage intégré, à moins que deux observateurs puissent être présents. Étant donné que l'instrument de mesure fait partie intégrante du thermomètre électrique, on peut vérifier son étalonnage en substituant au thermomètre à résistance une boîte de résistances à décades et en appliquant des résistances équivalant à des échelons de température fixes de 5 K sur toute la plage opérationnelle. L'erreur en un point quelconque ne doit pas excéder 0,1 K. Cette opération est généralement réalisée par un technicien de maintenance.

2.4.5.2 Thermocouples

L'étalonnage et la vérification des thermocouples impliquent de maintenir les jonctions froide et chaude à une température connue avec exactitude. Les techniques et les instruments requis pour entreprendre ce travail sont généralement très spécialisés et ne seront pas décrits plus avant.

2.4.6 Corrections

En sortie de fabrication, un thermomètre électrique (doté d'un numéro de série) est accompagné :

- (a) d'un certificat date confirmant qu'il est conforme à la norme applicable ; ou
- (b) d'un certificat daté d'étalonnage, indiquant la résistance réelle en des points fixes de la plage

de température. Il est recommandé d'utiliser ces valeurs pour vérifier l'incertitude d'un instrument de mesure ou d'une interface système avant et en cours d'utilisation. L'importance de l'écart de résistance par rapport à la valeur nominale ne doit généralement pas être supérieure à une erreur de température équivalente de 0,1 ou 0,2 K.

2.4.7 Maintenance

Il est recommandé de procéder à des vérifications régulières sur le terrain en vue de détecter toute modification dans l'étalonnage du système. Un tel phénomène peut s'expliquer par des changements dans les caractéristiques électriques du thermomètre sur le long terme, une dégradation des câbles électriques ou de leurs connexions, par une modification de la résistance des contacteurs ou encore des caractéristiques électriques du matériel de mesure. Pour pouvoir repérer la source exacte de ces erreurs et y remédier, il est nécessaire de disposer d'un matériel et d'une formation spécialisés. En principe cette opération ne peut donc être réalisée que par un technicien de maintenance.

2.5 ABRIS DE PROTECTION CONTRE LE RAYONNEMENT

Dans la mesure du possible, un abri ou un écran anti-rayonnement sera conçu de manière à constituer une enceinte dont la température intérieure sera uniforme et identique à la température extérieure. Il devra entourer complètement les thermomètres et ne laisser pénétrer ni la chaleur rayonnante, ni les précipitations ou autres phénomènes susceptibles d'influencer le résultat de la mesure. Des écrans dotés d'une ventilation forcée, dans lesquels de l'air est envoyé sur l'élément thermométrique à l'aide d'un ventilateur, peuvent contribuer à éviter les erreurs de justesse lorsque le microclimat qui règne à l'intérieur de l'écran s'écarte de la masse d'air environnante. Un tel écart ne s'observe que lorsque la vitesse naturelle du vent est faible ($< 1 \text{ m s}^{-1}$). Dans les cas de ventilation artificielle, des précautions doivent être prises pour éviter tout dépôt d'aérosols ou de gouttes de pluie sur le capteur, au risque sinon de faire baisser la température de ce dernier pour se rapprocher de la température du thermomètre mouillé. Il est préconisé d'utiliser par exemple un écran fabriqué dans un métal non-oxydé très poli en raison de son grand pouvoir réfléchissant et sa faible capacité d'absorption de la chaleur. Toutefois, on lui préférera un isolant thermique plastique, simple à entretenir. Le recours à un isolant thermique est obligatoire lorsque le système fait appel à la ventilation naturelle.

La performance d'un écran (tenue au rayonnement et effets du microclimat introduisant des biais indésirables) dépend essentiellement de sa conception, laquelle devra être étudiée avec le plus grand soin afin de garantir une protection contre le rayonnement et une ventilation suffisante. Depuis les premières mesures de température à des fins météorologiques, une grande diversité d'écrans ont été mis au point. Suite à l'introduction des mesures de température réalisées dans des stations météorologiques automatiques, la gamme des modèles s'est considérablement enrichie (OMM, 1998a). Il s'avère difficile de recommander un modèle particulier de mesures à l'échelle mondiale tant sont divers les conditions particulières d'application, le niveau d'automatisation et la situation climatologique. Toutefois, nombre de recherches et d'études comparatives ont été réalisées sur les différents types de conception et leurs performances respectives. L'OMM (1972) propose une synthèse claire des différents modèles d'écran existants. Les résultats des études comparatives portant sur les écrans de protection des thermomètres sont présentés par Andersson et Mattison (1991) ; Sparks (2001) ; OMM (1998b ; 1998c ; 1998d ; 2000a ; 2000b ; 2002b ; 2002c ; 2002d) ; et Zanghi (1987).

La norme internationale ISO/DIS 17714 définit les types d'écran les mieux adaptés et décrit les méthodes à adopter pour déterminer ou comparer les performances des différents écrans (ISO, 2004).

2.5.1 Abris à persiennes

La plupart des abris à persiennes, de conception très variée, font appel à la ventilation naturelle. Il convient de choisir de préférence des parois à doubles persiennes pour ce type d'abri avec un plancher fait de panneaux en chicane, (mais d'autres types de construction peuvent répondre aux exigences indiquées ci-dessus), un toit à double parois avec circulation d'air entre les deux. Dans les régions à climat froid, en raison du coefficient élevé de réflexion de la neige (jusqu'à 88 %), on préconise d'adopter également un double plancher capable de se rabattre ou de s'incliner pour évacuer la neige qui aurait pu s'infiltérer dans l'abri au cours d'une tempête.

Les dimensions et la construction de l'abri seront étudiées de façon à maintenir la capacité calorifique aussi basse que possible et à laisser suffisamment d'espace entre les instruments et les parois. La présence de cet espace élimine tout risque de contact direct entre les éléments sensibles des thermomètres et les parois ; elle est particulièrement importante dans les régions tropicales où l'insolation peut, en chauffant fortement les parois, provoquer la formation d'un gradient de température appréciable à l'intérieur de l'abri. Il faut éviter aussi les contacts

directs entre les éléments sensibles et le support des thermomètres. L'abri sera de préférence recouvert, intérieurement et extérieurement, d'une peinture blanche non-hygroskopique

Dans un abri à double paroi, le rideau d'air entre les parois permet de réduire la quantité de chaleur qui, sinon se propagerait de la paroi extérieure à l'intérieur de l'enceinte, surtout en cas fort ensoleillement. Par vent fort, l'air circule continuellement entre les deux parois, ce qui réduit encore davantage la propagation de la chaleur de la paroi externe vers l'intérieur de l'abri.

La libre circulation de l'air dans l'abri favorise l'adaptation de la température de la paroi intérieure aux variations de l'air ambiant, ce qui réduit l'influence de cette paroi sur la lecture du thermomètre. Elle permet également au thermomètre de s'adapter aux variations de température de l'air ambiant plus rapidement que si seuls des transferts radiatifs étaient en jeu. Toutefois, l'air qui circule dans l'abri entre en contact pendant un temps fini avec la paroi extérieure et sa température peut en être modifiée. Ce phénomène devient important lorsque le vent est faible et que la température de la paroi extérieure de l'abri est très différente de celle de l'air ambiant. Dès lors, la température de l'air à l'intérieur d'un abri tend à être supérieure à la température réelle de l'atmosphère par fort ensoleillement et temps calme, et à lui être légèrement inférieure les nuits où le ciel est clair et le temps calme, les écarts pouvant atteindre respectivement + 2,5 et - 0,5 K dans les cas extrêmes. D'autres erreurs peuvent se produire à cause du refroidissement dû à l'évaporation à partir d'un abri mouillé après la pluie. Toutes ces erreurs ont également une incidence directe sur la lecture d'autres instruments placés dans l'abri, notamment l'hygromètre, l'évapromètre et autres instruments similaires.

Les erreurs dues à des variations de la ventilation naturelle peuvent être réduites en adaptant à l'abri un système de ventilation artificielle bien conçu destiné maintenir un débit de renouvellement de l'air connu et constant, du moins par vent faible. Lors de la conception de tels systèmes, il faudra veiller à ce que la chaleur dégagée par le ventilateur ou un moteur électrique n'affecte pas la température sous l'abri.

En général, l'abri est doté d'une seule porte et est placé de sorte que les rayons du soleil ne viennent pas frapper directement les thermomètres lorsque celle-ci est ouverte pour effectuer une observation. En revanche, dans les régions tropicales, il convient d'en prévoir deux, utilisées alternativement en fonction de la saison. De même, dans les régions polaires (où le soleil reste bas sur l'horizon), il est conseillé de prendre des précautions particulières pour protéger

l'intérieur de l'abri des rayons du soleil, soit par un système d'auvent, soit par un écran monté sur un pivot permettant de l'orienter convenablement lorsqu'on ouvre la porte pour effectuer des relevés.

La plupart des abris sont encore en bois, mais les nouveaux modèles en plastique récemment mis au point, dotés de persiennes mieux conçues et donc d'une circulation d'air améliorée, offrent une meilleure protection contre le rayonnement. En tout état de cause, l'abri et son support seront de préférence construits dans un matériau robuste et solidement montés afin que les erreurs de lecture des thermomètres à minimum et à maximum imputables aux vibrations dues au vent soient réduites au minimum. Dans certaines régions, où ces vibrations ne peuvent pas être éliminées entièrement, il est recommandé d'effectuer un montage sur des supports élastiques. Le sol sous l'abri peut être recouvert d'herbe ou laissé à l'état naturel.

Il est conseillé de nettoyer et de repeindre régulièrement l'abri. Dans de nombreux endroits, il suffit de repeindre ce dernier tous les deux ans, mais dans les régions exposées à la pollution atmosphérique, il peut s'avérer nécessaire de le faire au moins une fois par an.

2.5.2 **Autres abris à ventilation artificielle**

La principale solution de recharge aux abris à persienne, qu'ils soient à ventilation naturelle ou

artificielle, consiste à protéger le réservoir du thermomètre contre le rayonnement direct en plaçant l'instrument dans l'axe de deux écrans cylindriques concentriques et en produisant une circulation d'air (de $2,5$ à 10 m s^{-1}) entre ceux-ci et à la hauteur du réservoir du thermomètre. Ce type d'exposition est normal dans les psychromètres à aspiration (chapitre 4, partie I). En principe, les écrans sont construits dans un matériau thermiquement isolant, bien que dans le psychromètre d'Assmann l'écran soit réalisé en métal très poli afin de réduire l'absorption du rayonnement solaire. Une circulation d'air est produite continuellement sur les deux côtés de l'écran intérieur de manière que sa température et, donc, celle du thermomètre soient aussi proches que possible de celle de l'air. Ordinairement, ces écrans sont montés à la verticale. La quantité de rayonnement direct à partir du sol qui entre par leur base est faible; on peut même la réduire en plaçant les écrans de façon que leur base se trouve bien au-dessous du réservoir du thermomètre. Quand la ventilation est produite par un ventilateur électrique, il faut s'efforcer d'empêcher que la chaleur produite par le moteur et le ventilateur n'atteigne les thermomètres.

Le psychromètre de référence de l'OMM a été conçu de manière à tenir dûment compte des effets du rayonnement et de l'utilisation d'une ventilation artificielle et d'écrans afin de s'assurer que l'élément thermométrique est en équilibre à la température vraie de l'air (chapitre 4, partie I).

ANNEXE

DÉFINITION DES POINTS FIXES DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1990

Les tableaux 1 et 2 indiquent respectivement les points de référence fixes et les points de référence secondaires de l'I 1990 qui concernent les mesures météorologiques.

La méthode standard d'interpolation entre les points de référence fixes fait appel à des formules servant à établir la relation entre les indications des instruments étalons et les valeurs de l'IT 1990. L'instrument étalon en usage pour la plage de températures comprise entre - 259,34° C et 630,74° C est un thermomètre à résistance de platine caractérisé par un rapport de résistance R_{100}/R_0 de 1,3850, R_{100} étant la résistance à 100 °C et R_0 la résistance à 0 °C.

De 0 °C à 630,74 °C, l'équation suivante permet de calculer la résistance à la température t :

$$R_t = R_0 (1 + A \times t + B \times t^2) \quad (1)$$

dans laquelle R_t est la résistance d'un fil de platine à la température t , R_0 sa résistance à 0 °C et A et B des constantes dont la valeur résulte de mesures de R_t au point d'ébullition de l'eau et au point de congélation du zinc.

L'équation ci-après permet de calculer la résistance du même fil de platine à la température t , dans la plage - 189,3442 °C à 0 °C :

$$R_t = R_0 (1 + A \times t + B \times t^2 + C \times (t-100) \times t^3) \quad (2)$$

dans laquelle R_t , R_0 , A et B sont déterminés comme dans l'équation 1 ci-dessus et C est mesuré au point d'ébullition de l'oxygène.

Tableau 1 : Définition des points fixes de l'EIT 90

<i>État d'équilibre</i>	<i>Valeur correspondant aux points de l'EIT</i>	
	<i>K</i>	<i>°C</i>
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'argon (point triple de l'argon)	83,805 8	-189,344 2
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur du mercure (point triple du mercure)	234,315 6	-38,8344
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'eau (point triple de l'eau)	273,16	0,01
Équilibre entre les phases solide et liquide du gallium (point de congélation du gallium)	302,914 6	29,764 6
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'indium (point de congélation de l'indium)	429,748 5	156,598 5

Tableau 2 : Températures correspondant aux points de référence secondaires de l'EIT 90

<i>Etat d'équilibre</i>	<i>Valeur correspondant aux points de l'EIT</i>	
	K	°C
Équilibre entre les phases solide et vapeur du dioxyde de carbone (point de sublimation du dioxyde de carbone) à la pression atmosphérique standard p_0 (1013,25 hPa).	194,686	-78,464
L'équation suivante permet de calculer la température t en fonction de la tension de vapeur du dioxyde de carbone :		
$t = [1.210,36 \times 10^{-2} (p-p_0) - 8.912,26 \times 10^{-6}(p-p_0)^2 - 78,464] \text{ } ^\circ\text{C}$		
où p est la pression atmosphérique en hPa, dans la plage de température comprise entre 194 et 195 K.		
Équilibre entre les phases solide et liquide du mercure (point de congélation du mercure) à la pression atmosphérique standard	234,296	-38,854
Équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air (point de fusion de la glace) à la pression atmosphérique standard	273,150	0,00
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur du phénolbenzène (diphénylethane) (point triple du phénolbenzène)	300,014	26,864

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Andersson, T. et I. Mattison, 1991 : *A Field Test of Thermometer Screens*, Rapport du SMHI No. RMK 62, Norrköping.
- Bureau International des Poids et Mesures/Comité Consultatif de Thermométrie, 1990 : The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) (H. Preston-Thomas). *Metrologia*, 1990, 27, pp. 3–10.
- Her Majesty's Stationery Office/Meteorological Office, 1980 : *Handbook of Meteorological Instruments*. deuxième édition, vol. 2, Measurement of temperature, Londres.
- Jones, E.B., 1992 : *Jones' Instrument Technology*, vol. 2, Measurement of temperature and chemical composition, quatrième édition, Butterworths-Heinemann, Oxford.
- Middleton, W.E.K. et A.F. Spilhaus, 1960 : *Meteorological Instruments*, troisième édition, University of Toronto Press.
- Organisation internationale de normalisation, 2004 : *Méthodes d'essai pour comparer la performance des protecteurs/écrans des thermomètres et pour définir les caractéristiques importantes*, ISO/DIS 17714, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1972 : *The Effect of Thermometer Screen Design on the Observed Temperature* (W.R. Sparks). OMM-No 315, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Measurement of Temperature and Humidity* (R.G. Wyllie et T. Lalas), Note technique No. 194, OMM-No. 759, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998a : *Recent Changes in Thermometer Screen Design and their Impact* (A. Barnett, D.B. Hatton et D.W. Jones). Rapport No. 66 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 871, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998b : An investigation of temperature screens and their impact on temperature measurements (J. Warne), *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-98)*, Rapport No. 70 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 877, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998c : A thermometer screen intercomparison (J.P. van der Meulen). *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-98)*, Rapport No. 70 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 877, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998d : Comparison of meteorological screens for temperature measurement (G. Lefebvre), *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-98)*, Rapport No. 70 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation (OMM/TD-No. 877), Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2000a : A comparison of air temperature radiation screens by field experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations (A. Spetalen, C. Lofseik et P. Ø. Nordli). *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2000)*, Rapport No. 74 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 1028, Genève
- Organisation météorologique mondiale, 2000b : Temperature measurements: Some considerations for the intercomparison of radiation screens (J.P. van der Meulen). *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2000)*, Rapport No. 74, de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 1028, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2002a : Measurement of temperature with wind sensors during severe winter conditions (M. Musa, S. Suter, R. Hyvönen, M. Leroy, J. Rast et B. Tammelin), *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2002)*, Rapport No. 75 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 1123, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2002b : Norwegian national thermometer screen intercomparison (M.H. Larre et K. Hegg), *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2002)*, Rapport No. 75 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 1123, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2002c : Results of an intercomparison of wooden and plastic thermometer screens (D.B. Hatton), *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2002)*, Rapport No. 75, de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-No. 1123, Genève.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Organisation météorologique mondiale, 2002d : Temperature and humidity measurements during icing conditions (M. Leroy, B. Tammelin, R. Hyvönen, J. Rast et M. Musa). *Communication présentée à la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2002)*, Rapport No. 75 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD - No. 1123, Genève.
- Sparks, W.R., 1970 : Current concepts of temperature measurement applicable to synoptic networks, *Meteorological Monographs*, vol. 11, No. 33, pp. 247–251.
- Sparks, W.R., 2001 : Field trial of Metspec screens, *Rapport technique TR19*, Met Office/OD, Wokingham, Royaume-Uni.
- Zanghi, F., 1987 : *Comparaison des abris météorologiques*, Note technique No 11, Météo-France/SETIM, Trappes.

CHAPITRE 3

MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

3.1 GÉNÉRALITÉS

3.1.1 Définition

La pression atmosphérique sur une surface donnée est la force que l'atmosphère sus-jacente exerce en raison de son poids par unité de surface ; elle est donc égale au poids de la colonne d'air verticale qui s'étend d'une projection horizontale de la surface en question jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère.

Il convient de déterminer, outre la pression elle-même, la tendance de la pression, c'est-à-dire la nature et l'amplitude de la variation barométrique observée sur une période de 3 h, ou sur une période de longueur différente, qui se termine au moment de l'observation. La tendance est formée de deux éléments: la variation et la caractéristique. La variation de la pression est la différence nette entre les lectures effectuées au début et à la fin de l'intervalle spécifié. La caractéristique de la pression décrit la manière dont la variable a évolué au cours de cette période: diminution suivie d'une augmentation, augmentation suivie d'une augmentation plus rapide, par exemple.

3.1.2 Unités et échelles

L'unité fondamentale de pression atmosphérique est le pascal (Pa) (ou le Newton par mètre carré). La pratique veut que l'on utilise, pour indiquer la pression en météorologie appliquée, l'hectopascal (hPa) qui équivaut à 100 Pa, principalement car il correspond à l'unité utilisée auparavant, soit le millibar (mbar).

Tous les baromètres météorologiques devraient être gradués en hectopascals. Certains baromètres sont gradués en millimètres ou pouces de mercure dans des conditions normales, soit respectivement (mm Hg)_n et (in Hg)_n. Lorsqu'il ressort clairement du contexte que l'on se trouve en présence de conditions normales, on peut utiliser les expressions abrégées «millimètres de mercure» ou «pouces de mercure». Dans ces conditions, une colonne de mercure d'une hauteur vraie de 760 (mm Hg)_n exerce une pression de 1 013,250 hPa.

On peut donc appliquer les facteurs de conversion suivants :

$$1 \text{ hPa} = 0,750\,062 \text{ (mm Hg)}_n$$
$$1 \text{ (mm Hg)}_n = 1,333\,224 \text{ hPa}$$

Si l'on admet le rapport conventionnel utilisé dans les domaines techniques entre le pouce et le millimètre, à savoir 1 pouce = 25,4 millimètres, on obtient les facteurs de conversion suivants :

$$1 \text{ hPa} = 0,029\,530 \text{ (in Hg)}_n$$

$$1 \text{ (in Hg)}_n = 33,863\,9 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ (mm Hg)}_n = 0,039\,370\,08 \text{ (in Hg)}_n$$

Pour les applications météorologiques, les échelles des baromètres à mercure doivent être graduées de manière à donner directement des lectures exactes en unités standard lorsque l'instrument tout entier est soumis à la température normale de 0 °C et à l'accélération normale de la pesanteur (9,806 65 m s⁻²).

Plusieurs échelles peuvent être gravées sur un même baromètre, gradués par exemple hPa et (mm Hg)_n, ou hPa et (in Hg)_n, pourvu que le baromètre soit correctement étalonné dans les conditions normales.

Les données de la pression atmosphérique devraient être exprimées en hectopascals. Dans le reste du présent chapitre, l'hectopascal est la seule unité utilisée.

3.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

L'analyse des champs de pression tient une place fondamentale en météorologie. Comme toutes les prévisions de l'état de l'atmosphère reposent sur cette analyse, il est indispensable de définir avec exactitude les champs de pression. Compte tenu de limites financières现实的, la technologie détermine le degré d'exactitude qu'il convient d'atteindre dans la mesure de la pression. Il faut en outre veiller à l'uniformité des procédures de mesure et d'étalonnage à l'échelle internationale.

Les différentes commissions techniques de l'OMM ont défini les exactitudes requises pour que la mesure de la pression satisfasse les exigences des diverses applications météorologiques, ce qui est brièvement exposé dans l'annexe 1.B du chapitre 1 de la Partie I, qui constitue la principale référence pour les spécifications des mesures dans le présent Guide. Les besoins sont:

- Gamme de mesure : 500 – 1 080 hPa (pression à la station et pression au niveau de la mer)
- Incertitude requise : 0,1 hPa
- Résolution du relevé : 0,1 hPa

- Constante de temps du capteur : 20 s
- Intervalle de temps pour le calcul de la moyenne : 1 min

Il y a lieu de tenir compte des besoins ci-dessus comme de critères à respecter pour les nouveaux baromètres placés dans des conditions subissant un contrôle strict, que l'on trouve notamment dans les laboratoires bien équipés. Ce sont des critères à appliquer aux baromètres avant l'installation dans les conditions d'exploitation.

Pour ce qui concerne les baromètres fonctionnant dans des conditions d'exploitation, les services météorologiques nationaux doivent se doter d'instruments soigneusement conçus pour maintenir l'exactitude requise, en dépit des contraintes d'ordre pratique. Une attention particulière doit être portée au baromètre lui-même, mais aussi à son exposition. Toutefois, pour ce qui est des baromètres des stations appartenant à un réseau de mesure opérationnel, qui ont été étalonnés par comparaison avec un baromètre étalon dont l'erreur instrumentale est connue et a été compensée, les écarts spécifiés ne doivent pas être dépassés.

3.1.4 Méthodes de mesure et d'observation

En météorologie, la pression atmosphérique est en général mesurée à l'aide de baromètres électroniques, de baromètres à mercure, de baromètres anéroïdes ou d'hypsomètres. La dernière classe d'instruments, dont le fonctionnement dépend de la relation entre le point d'ébullition d'un liquide et la pression atmosphérique, n'a fait l'objet que d'une utilisation assez restreinte à ce jour et ne sera pas examinée en détail dans la présente publication. Le lecteur trouvera un exposé très utile concernant les baromètres numériques (qui pour la plupart ont une lecture électronique) dans OMM (1992a).

Les instruments de mesure de la pression atmosphérique (baromètres) conviennent à l'exploitation en météorologie à condition de remplir les conditions suivantes :

- a) Ils doivent être étalonnés ou vérifiés régulièrement par comparaison avec un baromètre étalon de travail et suivant les procédures établies. L'intervalle entre deux étalonnages doit être suffisamment court, ce qui permet de veiller à ce que l'erreur totale absolue des mesures se situe dans les limites de l'exactitude requise définies dans le présent chapitre.
- b) Toutes variations de l'exactitude (à long terme ou à court terme) doivent être beaucoup plus petites que les tolérances stipulées dans la section 3.1.3. Lorsque, grâce aux étalonnages, on décèle une dérive pour certains instruments,

ceux-ci ne pourront servir en exploitation qu'à condition de suffisamment réduire l'intervalle entre les étalonnages pour garantir l'exactitude requise des mesures sur cette durée.

- c) Les variations de température ne devraient pas avoir d'effet sur les résultats des lectures de l'instrument. Les conditions suivantes doivent donc être remplies :
 - Des procédures de correction de température doivent garantir l'exactitude requise, et/ou,
 - Le capteur de pression est placé dans des conditions où la température est stabilisée, de manière que l'exactitude requise soit respectée.
 Certains instruments mesurent la température du capteur de pression afin de compenser les effets de la température. Il est dans ce cas nécessaire de vérifier et d'étalonner les fonctions de compensation au cours de l'étalonnage normal de l'instrument.
- d) L'instrument doit être placé dans des conditions où les effets extérieurs n'entraîneront pas d'erreur dans les mesures. Ces effets comprennent le vent, le rayonnement ou la température, les chocs et les vibrations, les fluctuations de l'alimentation électrique et les brusques variations de pression. L'emplacement de l'instrument doit être choisi avec le plus grand soin, surtout dans le cas de baromètres à mercure. Il importe que tous les observateurs en météorologie soient pleinement conscients de ces effets et soient en mesure d'évaluer si l'un d'eux a des conséquences sur l'exactitude des résultats des lectures du baromètre en service.
- e) La lecture de l'instrument doit être aisée et rapide. Les instruments doivent être conçus de manière que l'écart type des relevés soit inférieur au tiers de l'exactitude absolue stipulée.
- f) Si un baromètre ne peut être étalonné à son emplacement, la méthode de transport ne doit pas avoir de conséquence sur la constance ou l'exactitude de l'instrument. Les effets qui risquent de modifier l'étalonnage d'un baromètre sont notamment les chocs et les vibrations mécaniques, tout éloignement de la position verticale et les grandes variations de pression, telles que celles que peut subir un instrument transporté par aéronef.

La plupart des baromètres modernes comprennent des transducteurs qui transforment la réponse du capteur en quantités liées à la pression. Ces quantités sont ensuite traitées au moyen de circuits électriques d'intégration ou de systèmes d'acquisition de données appropriés utilisant les algorithmes de lissage qui conviennent. Pour la plupart des applications synoptiques, il est souhaitable de définir une constante de temps de 10 s pour les baromètres, la

valeur à ne pas dépasser étant 20 s. La constante de temps n'a en général pas d'importance pour les baromètres à mercure.

Il existe plusieurs méthodes générales de mesure de la pression atmosphérique. Elles sont décrites brièvement dans les paragraphes qui suivent.

Du point de vue historique, la méthode la plus utilisée pour mesurer la pression qu'exerce l'atmosphère consiste à créer un équilibre par rapport au poids d'une colonne de liquide. Pour diverses raisons, seul le mercure permet en pratique d'atteindre l'exactitude requise pour ce mesurage. Les baromètres à mercure se distinguent en général par leurs bonnes constance et exactitude à long terme, mais ils commencent à être supplantés par les baromètres électroniques, tout aussi exacts et plus faciles à lire.

Une membrane constituée d'un matériau élastique, retenue sur son pourtour, se déforme en cas de différence de pression entre ses deux côtés. Dans la pratique, on utilise une capsule métallique fermée, à l'intérieur de laquelle on a créé un vide complet ou partiel, et contenant un robuste ressort métallique qui empêche la capsule de s'affaisser sous la pression atmosphérique extérieure. Des moyens mécaniques ou électriques permettent de mesurer la déformation causée par la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la capsule. Il s'agit là du principe du baromètre anéroïde bien connu.

Des éléments constitués de cylindres aux minces parois en alliage de nickel, sous vide, ont été mis au point. La fréquence de résonance naturelle de ces cylindres varie en fonction de la différence de pression entre l'intérieur du cylindre, qui se trouve à la pression atmosphérique ambiante, et l'extérieur du cylindre maintenu sous vide.

Les transducteurs de la pression absolue composés d'un élément en cristal de quartz sont de plus en plus utilisés. La pression qui s'exerce, par l'intermédiaire d'une capsule souple, sur une face du cristal crée une force de compression. Compte tenu des propriétés piézoélectriques du cristal, la pression modifie l'équilibre d'un pont de Wheatstone actif. Retrouver la condition d'équilibre permet de déterminer avec exactitude la pression. L'hystérésis est virtuellement éliminée dans ces types de transducteurs de pression.

La température d'ébullition d'un liquide varie en fonction de la pression qui s'exerce sur ce liquide. Une fois la relation établie, il est possible d'obtenir avec un hygomètre la pression atmosphérique à partir de la température d'ébullition du liquide.

3.2

BAROMÈTRES À MERCURE

Ces baromètres sont de moins en moins utilisés, pour plusieurs raisons: le mercure dégage des vapeurs très toxiques; à l'état libre, il corrode les alliages d'aluminium présents dans les cellules d'aéronefs (ce qui a conduit certains pays à interdire la manutention ou le transport des baromètres à mercure); le tube doit être fait d'un verre au plomb spécial; l'appareil est très fragile et difficile à transporter; l'entretien est délicat et les déversements accidentels sont difficiles à nettoyer; la lecture et les corrections doivent se faire à la main; enfin, on trouve couramment aujourd'hui des capteurs de pression à affichage électronique qui présentent la même exactitude et la même constance.

3.2.1

Caractéristiques essentielles

Le principe fondamental du baromètre à mercure est que la pression atmosphérique fait équilibre au poids d'une colonne de mercure. Dans certains baromètres, la colonne de mercure est pesée sur une balance mais, pour les applications normales de la météorologie, sa hauteur est mesurée sur une échelle graduée en unités de pression.

Plusieurs types de baromètres à mercure sont en usage dans les stations météorologiques, le type à cuvette fixe et le type Fortin étant les plus courants. Il convient de mesurer la distance entre le sommet de la colonne de mercure et le niveau supérieur du mercure dans la cuvette. Chaque changement de la longueur de la colonne de mercure s'accompagne évidemment d'un changement du niveau du mercure dans la cuvette. Dans le cas du baromètre Fortin, on ajuste le niveau du mercure dans la cuvette de manière à le mettre en contact avec une pointe de référence en ivoire, dont l'extrémité se trouve en face du zéro de l'échelle barométrique; dans celui du baromètre à cuvette fixe, appelé également baromètre du type Kew, aucun ajustement n'est nécessaire puisque l'échelle gravée sur le baromètre est établie de façon à compenser les modifications du niveau du mercure dans la cuvette.

3.2.2

Caractéristiques générales

Un bon baromètre à mercure de station devrait remplir les conditions principales suivantes :

- a) Son exactitude devrait rester invariable pendant de longues périodes. L'hystérésis, notamment, devrait demeurer faible ;
- b) Sa lecture devrait être facile et rapide. Il faudrait corriger tous les effets connus dans les relevés. Les observateurs qui procèdent aux corrections doivent être conscients de leur importance, afin de les appliquer correctement et

- de ne pas, au contraire, entraîner une détérioration de l'exactitude des mesures ;
- c) L'instrument doit pouvoir être transporté sans que son exactitude en souffre ;
 - d) Le calibre du tube ne devrait pas être inférieur à 7 mm et devrait, de préférence, être de 9 mm ;
 - e) Le tube devrait être préparé et rempli sous vide. La pureté du mercure revêtant une extrême importance, il faudrait que celui-ci ait été distillé deux fois, dégraissé, lavé à maintes reprises et filtré ;
 - f) La température réelle pour laquelle l'échelle est censée donner des lectures exactes (pour une accélération normale de la pesanteur) devrait être gravée sur le baromètre; les échelles devraient, de préférence, être graduées de façon que les lectures soient exactes à 0 °C ;
 - g) Le ménisque ne devrait pas être plat, à moins que le tube n'ait un grand diamètre (>20 mm) ;
 - h) Pour un baromètre de marine, l'erreur ne devrait pas excéder 0,5 hPa, quel que soit le relevé.

Le temps de réponse des baromètres à mercure utilisés dans les stations terrestres est généralement très faible comparé à celui des baromètres de marine et des instruments servant à mesurer la température, l'humidité et le vent.

3.2.3 Conditions normales

Comme la hauteur de la colonne de mercure d'un baromètre ne dépend pas seulement de la pression atmosphérique, mais également d'autres facteurs (notamment de la température et de l'accélération de la pesanteur), il est nécessaire de spécifier les conditions normales dans lesquelles le baromètre devrait théoriquement donner des lectures exactes de la pression. Les normes ci-après figurent dans les conventions barométriques internationales.

3.2.3.1 Température normale et densité normale du mercure

0 °C est la température normale à laquelle les lectures des baromètres à mercure sont réduites pour éliminer les erreurs associées au changement de densité du mercure induit par la température.

La valeur admise pour la densité normale du mercure à 0 °C est 1,359 51 x10⁴ kg m⁻³; pour calculer la pression absolue à l'aide de l'équation hydrostatique, le mercure dans la colonne d'un baromètre est, par convention, considéré comme un fluide incompressible.

L'utilisation de mercure impur, dont la masse volumique est différente de celle du mercure pur,

entraîne des erreurs de lecture, étant donné que la pression indiquée est proportionnelle à la densité du mercure.

3.2.3.2 Accélération normale de la pesanteur

Les lectures barométriques doivent être ramenées de la valeur locale de l'accélération de la pesanteur à la valeur normale de cette accélération. La valeur normale de l'accélération de la pesanteur (g_n) est considérée comme étant une constante conventionnelle: $g_n = 9,806\ 65\text{ m s}^{-2}$.

- Note : La nécessité d'adopter une valeur de référence arbitraire pour l'accélération de la pesanteur est expliquée dans OMM (1966). Cette valeur ne peut être associée précisément à une valeur mesurée ou théorique de l'accélération de la pesanteur dans des conditions données, à une latitude de 45° et au niveau de la mer par exemple, puisqu'il est probable qu'une telle valeur évolue en fonction des données expérimentales les plus récentes.

3.2.4 Lecture des baromètres à mercure

Lorsqu'une observation est effectuée à l'aide d'un baromètre à mercure, le thermomètre du baromètre devrait être lu en premier lieu. Cette lecture devrait être faite aussi rapidement que possible, étant donné que la température du thermomètre peut monter du fait de la présence de l'observateur. Celui-ci tapotera du doigt l'instrument en deux endroits, près du ménisque et près de la cuvette, afin de stabiliser les surfaces du mercure. Si le baromètre n'est pas du type à cuvette fixe, l'ajustement nécessaire devrait être fait pour que le mercure dans la cuvette entre en contact avec la pointe de référence. Enfin, le vernier devrait être ajusté sur le ménisque et la lecture effectuée. Le vernier est correctement ajusté quand son bord inférieur horizontal semble toucher la partie supérieure du ménisque; avec une loupe, il doit être possible de voir une ligne de lumière extrêmement fine entre le vernier et le sommet de la surface de mercure. En aucune circonstance le vernier ne doit «couper» le sommet du ménisque. L'œil devrait être placé de façon à ce que les bords inférieurs (antérieur et postérieur) du vernier soient dans la ligne de vision.

3.2.4.1 Exactitude de la lecture

La lecture devrait être faite au plus proche dixième d'hectopascal. Il est en général impossible de lire le vernier avec une exactitude plus grande.

Des systèmes optiques et numériques ont été mis au point pour améliorer la lecture des baromètres à mercure. Bien qu'ils facilitent normalement les observations, ils peuvent néanmoins constituer des sources d'erreurs s'ils n'ont pas été conçus et étalonnés soigneusement.

3.2.4.2 Variations de la correction du zéro

Chaque fois qu'une inspection révèle une variation de la correction du zéro d'un baromètre, il est nécessaire de chercher quelles peuvent en être les causes, en tenant compte des points suivants :

- a) Le fonctionnement antérieur de l'instrument ;
- b) L'expérience de l'inspecteur en matière de comparaison ;
- c) L'ampleur de la variation ;
- d) L'écart type des différences ;
- e) L'existence éventuelle à la station d'un autre baromètre pour lequel la correction exacte est connue ;
- f) Le fonctionnement des étalons voyageurs au cours du déplacement ;
- g) La compatibilité ou l'incompatibilité des lectures de pression faites à la station, variation comprise, avec celles des stations voisines pointées sur la carte synoptique quotidienne ;
- h) Le fait que l'instrument a été, ou non, nettoyé avant la comparaison.

Les variations de la correction du zéro, ou dérive, des baromètres de station peuvent être dues :

- a) Aux variations de la dépression capillaire des surfaces de mercure lorsque celui-ci est contaminé. Dans les régions où l'atmosphère est très polluée par des sources industrielles, la contamination du mercure peut constituer un problème sérieux et nécessiter un nettoyage relativement fréquent du mercure et de la cuvette du baromètre ;
- b) À l'ascension de bulles d'air dans le mercure jusqu'à la partie supérieure du tube.

Ces variations, suivant leurs causes, peuvent être irrégulières ou être constamment positives ou négatives.

Les variations de la correction du zéro peuvent aussi être dues :

- a) À une erreur de l'observateur qui a omis de tapoter le baromètre avant de procéder à la lecture ou encore qui a mal réglé le vernier ou la pointe de référence ;
- b) À un défaut d'équilibre thermique dans le baromètre de la station ou dans l'étalon voyageur ;
- c) À la non-simultanéité des lectures alors que la pression varie très rapidement.

Elles peuvent aussi résulter d'un déplacement accidentel de l'échelle réglable et d'un décalage de la pointe de référence dans le cas des baromètres du type Fortin.

3.2.4.3 Variations admises de la correction du zéro

Les critères suivants devraient être appliqués :

- a) Une variation de correction de moins de 0,1 hPa est négligeable à moins qu'elle ne persiste ;
- b) Une variation de correction supérieure à 0,1 hPa mais inférieure à 0,3 hPa peut être acceptée provisoirement, sauf si elle est confirmée lors d'une comparaison ultérieure au moins ;
- c) Une variation de correction supérieure à 0,3 hPa ne peut être acceptée provisoirement que si le baromètre est nettoyé et qu'il n'existe pas à la station d'autre baromètre dont on connaisse la correction. L'instrument doit être remplacé dès que l'on peut disposer d'un autre baromètre correctement étalonné.

Les baromètres dont les variations de correction coïncident aux cas b) et c) doivent être surveillés de près. Il faut les réétalonner ou les remplacer dès que possible.

Les critères établis pour les baromètres de station sont aussi applicables aux étalons voyageurs. Une variation de correction inférieure à 0,1 hPa est négligeable si elle ne persiste pas. Une variation plus importante devrait être confirmée et acceptée seulement après plusieurs comparaisons répétées. Les corrections du zéro d'un baromètre voyageur, avant et après un déplacement, ne devraient pas différer de plus de 0,1 hPa. C'est pourquoi on ne devrait utiliser comme étalons voyageurs que des baromètres dont les corrections antérieures sont longtemps restées constantes.

3.2.5 Correction des lectures du baromètre aux conditions normales

Il y a lieu d'appliquer les corrections suivantes afin que les lectures du baromètre faites à des heures différentes et en des lieux différents puissent être utilisées comme valeurs de la pression atmosphérique :

- a) Correction de l'erreur instrumentale ;
- b) Correction de pesanteur ;
- c) Correction de température.

Il est possible, en suivant les instructions fournies par le fabricant du baromètre, d'obtenir des résultats acceptables pour un grand nombre d'applications météorologiques opérationnelles, à condition d'être certain que ces procédures donneront des lectures de la pression qui présentent l'incertitude requise. Toutefois, si les résultats ne sont pas satisfaisants ou si une plus grande précision est exigée, il convient

de suivre les procédures détaillées qui figurent à l'annexe 3.A en ce qui concerne la correction des facteurs indiqués ci-dessus.

3.2.6 **Erreurs et défauts des baromètres à mercure**

3.2.6.1 **Incertitude relative à la température de l'instrument**

La température indiquée par le thermomètre du baromètre n'est généralement pas identique à la température moyenne du mercure, de l'échelle et de la cuvette. L'erreur due à cet écart peut être diminuée par une exposition favorable et par l'application d'une méthode d'observation adéquate. Soulignons qu'il existe souvent dans une pièce un gradient vertical de température stable et très prononcé, ce qui est de nature à provoquer des différences de température considérables entre le haut et le bas du baromètre. Un ventilateur électrique peut empêcher cette distribution de la température, mais il peut aussi causer des variations locales de la pression; il devrait donc être arrêté avant l'observation. Dans des conditions normales, l'erreur dans la réduction pour la température n'excédera pas 0,1 hPa si l'on prend les précautions indiquées.

3.2.6.2 **Vide défectueux**

On présume en général que le vide est parfait ou qu'il n'y a qu'une quantité négligeable de gaz au-dessus de la colonne de mercure lorsque l'instrument est étalonné. Tout changement de cette condition causera une erreur dans les lectures de la pression. Une façon rudimentaire de déceler la présence de gaz dans le tube du baromètre consiste à incliner le tube en écoutant si un «clic» se produit quand le mercure atteint le sommet ou à regarder si l'extrémité fermée ne renferme pas une bulle d'air. Le diamètre de celle-ci ne devrait pas excéder 1,5 mm lorsque le baromètre est incliné. La présence de vapeur d'eau ne peut pas être décelée de cette façon, car la vapeur se condense quand le volume d'espace diminue. Selon la loi de Boyle, l'erreur provoquée par la présence d'air et de vapeur d'eau non saturante dans l'espace situé au-dessus du mercure est inversement proportionnelle au volume de cet espace. Le seul moyen satisfaisant de remédier à cette erreur est d'effectuer un nouvel étalonnage sur toute l'étendue de l'échelle; si l'erreur est grande, le tube du baromètre devrait être rempli à nouveau ou remplacé.

3.2.6.3 **Dépression capillaire de la surface du mercure**

La hauteur du ménisque et, par conséquent, la dépression capillaire¹ peuvent varier, pour un tube donné, avec la tendance barométrique, l'âge du réci-

pient de verre, la pollution du mercure et la position de celui-ci dans le tube. Pour autant qu'il est possible de le faire, la hauteur moyenne du ménisque devrait être observée pendant l'étalonnage initial et notée sur le certificat du baromètre. Cependant, aucune correction ne devrait être faite pour des écarts par rapport à la hauteur initiale du ménisque; l'information ne devrait être utilisée que comme une indication de la nécessité ou de l'inutilité d'une révision ou d'un nouvel étalonnage du baromètre. Une variation de 1 mm dans la hauteur du ménisque (de 1,8 à 0,8 mm), pour un tube de 8 mm, peut causer une erreur d'environ 0,5 hPa dans les lectures de pression.

Il faut savoir également qu'une grande variation de l'angle de contact entre le mercure et la paroi de la cuvette d'un baromètre à cuvette fixe peut causer des erreurs, petites mais appréciables, dans les pressions observées.

3.2.6.4 **Manque de verticalité**

Si la base d'un baromètre symétrique de longueur normale (environ 90 cm), suspendu librement, est décalée de 6 mm environ par rapport à la position verticale, la pression indiquée sera trop élevée d'à peu près 0,02 hPa. De tels baromètres sont en général suspendus plus verticalement que cela.

Cependant, quand il s'agit d'un baromètre asymétrique, cette cause d'erreur est plus importante. Si, par exemple, la pointe de référence dans la cuvette est à environ 12 mm de l'axe, il suffit que la cuvette soit décalée d'environ 1 mm par rapport à la verticale pour causer une erreur de 0,02 hPa.

3.2.6.5 **Exactitude générale des lectures de pression corrigées**

L'erreur type d'une seule lecture de baromètre corrigée, dans une station météorologique ordinaire, devrait être inférieure à 0,1 hPa. Cette erreur sera principalement le résultat de l'incertitude inévitable quant à l'erreur instrumentale, de l'incertitude quant à la température de l'instrument et de l'erreur provoquée par l'effet de pistonnage des rafales de vent sur la surface du mercure.

3.2.7 **Règles de sécurité applicables à l'utilisation du mercure**

Le mercure est utilisé en assez grande quantité dans les baromètres; il s'agit d'un produit nocif qui exige de prendre certaines précautions quand on

¹ On désigne par ce terme l'abaissement du ménisque d'un liquide placé dans un tube lorsque ce liquide (tel le mercure) ne mouille pas les parois du récipient. Le ménisque est convexe, orienté vers le haut.

le manipule. Aux températures et pressions ordinaires à la surface terrestre, le mercure élémentaire est un liquide qui dégage, à l'air libre, des vapeurs. Il est absorbé par voie transcutanée à l'état gazeux et liquide et par voie pulmonaire sous forme de vapeur. Ses propriétés sont décrites par Sax (1975). Dans de nombreux pays, les précautions qui s'appliquent à l'utilisation du mercure sont prescrites par les règlements visant la manutention des matières dangereuses.

En forte concentration, le mercure est hautement toxique. Il a en outre la propriété de s'accumuler dans les tissus mous et durs du corps humain, ce qui signifie qu'une exposition prolongée à de faibles doses peut entraîner à long terme la détérioration des organes touchés, voire la mort. Le mercure s'attaque principalement au système nerveux, à la cavité buccale et aux gencives; les symptômes sont notamment des douleurs, le déchaussement des dents, des réactions allergiques, des tremblements et des troubles psychologiques.

En ce qui a trait aux baromètres, c'est dans les laboratoires où l'on vide ou remplit fréquemment les instruments que les risques sont les plus importants. Il peut aussi subvenir des problèmes dans une station météorologique lorsque, par exemple, un baromètre s'est brisé et qu'on laisse le mercure se transformer en vapeur dans un lieu clos où travaillent des personnes.

Un danger existe même si le mercure demeure dans un récipient hermétiquement fermé et si l'on procède à un nettoyage en cas d'accident. Il y a lieu de tenir compte des points ci-après lorsqu'on travaille avec du mercure :

- a) Le mercure doit être contenu dans des récipients scellés qui ne risquent pas de fuir ou de se briser et qui sont inspectés régulièrement ;
- b) Dans les pièces où l'on entrepose ou emploie de grandes quantités de mercure, le sol doit être recouvert d'un revêtement, en polychlorure de vinyle (PVC) par exemple, offrant une bonne étanchéité et ne présentant aucune fissure. En effet, des gouttelettes de mercure pourraient se loger dans de petits interstices, entre des carreaux de sol par exemple. Il est en outre préférable que le revêtement remonte d'une dizaine de centimètres le long des murs afin qu'il n'y ait pas de joint au niveau des plinthes ;
- c) Il ne faut pas entreposer le mercure dans des récipients métalliques, puisqu'il entre en réaction avec la plupart des métaux, à l'exception du fer, pour former un amalgame potentiellement nocif. De même, il faut éviter tout contact entre le mercure et quelque objet métallique que ce soit ;

- d) Il ne faut pas entreposer le mercure près d'autres substances chimiques, en particulier les amines, l'ammoniac et l'acétylène ;
- e) La pièce dans laquelle sont entreposées ou manipulées de grandes quantités de mercure doit être équipée d'une bonne ventilation. Toute manipulation du mercure libre doit se dérouler sous une hotte de bonne qualité ;
- f) Il ne faut jamais entreposer le mercure près d'une source de chaleur, quelle qu'elle soit, car son point d'ébullition est assez bas (357 °C). En cas d'incendie notamment, le mercure peut dégager des concentrations dangereuses de vapeurs toxiques ;
- g) En cas de manipulation de mercure, il convient de faire subir des contrôles réguliers à la fois au personnel et à la pièce de travail afin de déceler toute quantité de mercure anormalement élevée.

3.2.7.1 Déversement et nettoyage

Deux méthodes sont couramment employées pour nettoyer un déversement accidentel de mercure: le ramassage par aspiration à l'aide d'un système tel que celui qui est décrit ci-dessous ou l'adsorption ou l'amalgamation pour obtenir une poudre.

Les déversements de mercure nécessitent une intervention immédiate. Le personnel chargé du nettoyage doit porter des gants simples ou à Crispin, en polychlorure de vinyle, des lunettes de protection et, si la quantité de mercure déversée est importante, un masque à gaz doté d'une cartouche qui filtre les vapeurs de mercure. Suivant l'ampleur du déversement, on procédera tout d'abord à un ramassage par aspiration, puis on utilisera un adsorbant pour éliminer les petites gouttelettes. Cette deuxième opération est indispensable car, à l'occasion d'un déversement, des dizaines de gouttelettes d'un diamètre inférieur à 0,02 mm se répandent et adhèrent aux surfaces, de sorte que le ramassage par aspiration n'est pas suffisamment efficace.

Ramassage par aspiration : L'appareil utilisé comprend un tube en plastique de petit diamètre servant à aspirer le mercure dans un vase de décantation en verre contenant environ 3 cm d'eau, l'orifice du tube étant situé sous la surface de l'eau. Dans ce vase, plus précisément dans l'air qu'il contient, aboutit l'extrémité d'une tubulure en plastique de diamètre plus important, qui est reliée à un aspirateur ou à une pompe à vide. L'eau présente dans le vase empêche les vapeurs ou les gouttelettes de mercure d'atteindre l'aspirateur ou la pompe. Une fois le nettoyage terminé, la suspension épaisse (boue) est placée dans un récipient en plastique soigneusement identifié, pour la mise au rebut.

Matériau adsorbant : Il est possible d'utiliser divers composés pour produire l'adsorption ou l'amalgamation du mercure, notamment de la poussière de zinc, de la farine de soufre ou du charbon actif. Le matériel nécessaire est vendu dans le commerce. Il suffit de répandre l'adsorbant en poudre sur le mercure, de laisser l'adsorption ou l'amalgamation se produire, puis de balayer la poudre et de la placer dans un récipient en plastique soigneusement identifié, pour la mise au rebut.

Le mercure ainsi recueilli peut être soit mis au rebut soit récupéré. Il est possible de se procurer, auprès des autorités compétentes ou du fabricant, les consignes à suivre pour se débarrasser du mercure. Le fabricant peut aussi indiquer comment récupérer et purifier le mercure.

3.2.7.2 Incendie

Le mercure ne brûle pas mais dégage de grandes quantités de vapeurs denses et toxiques. À la suite d'un incendie, les vapeurs se condensent sur les surfaces froides les plus proches. Elles peuvent contaminer ainsi une zone assez vaste et être adsorbées sur des surfaces nues, telles que le bois de charpente carbonisé. En cas d'incendie, il faut évacuer les lieux et se placer au vent du sinistre. Il faut également signaler aux pompiers l'emplacement et la quantité du mercure.

3.2.7.3 Transport

Le transport par voie aérienne du mercure ou d'instruments contenant du mercure fait l'objet d'une réglementation établie par l'Association du transport aérien international (IATA). Le transport par voie ferrée ou par route est régi d'ordinaire par la réglementation des matières dangereuses propre à chaque pays.

De manière générale, il convient de transporter le mercure métallique dans des récipients en plastique ou en verre d'une capacité inférieure à 2,5 kg. L'emballage des récipients doit être suffisamment rembourré pour éviter que ces derniers ne cassent et doit indiquer la nature du contenu. Les instruments qui contiennent du mercure doivent être emballés dans un étui solide et rembourré, hermétique et étanche au mercure.

3.3 BAROMÈTRES ÉLECTRONIQUES

La plupart des baromètres de conception récente utilisent des transducteurs qui transforment les variations d'un capteur de pression en un signal électrique. Il peut s'agir d'un signal analogique, tel que la tension (en courant continu ou en courant alter-

natif, la fréquence étant fonction de la pression), ou d'un signal numérique, tel que la fréquence de répétition des impulsions ou encore découlant de protocoles de communication de données normalisés (RS232, RS422 ou IEEE488 par exemple). Divers types d'appareils de mesure électroniques permettent d'afficher les signaux analogiques. Les systèmes de contrôle et d'acquisition de données, tels ceux qui équipent les stations météorologiques automatiques, sont fréquemment employés pour afficher les signaux de sortie numériques ou les signaux analogiques numérisés.

La technologie appliquée actuellement aux baromètres électroniques fait appel à divers degrés de redondance pour améliorer la constance à long terme des mesures et leur exactitude. L'une des techniques employées consiste en trois capteurs fonctionnant de façon indépendante sous le contrôle d'un microprocesseur central. Il est possible d'améliorer encore plus la constance et la fiabilité en utilisant trois baromètres entièrement indépendants, comprenant trois ensembles de transducteurs de pression et de microprocesseurs. Chaque configuration inclut une compensation thermique automatique opérant à partir de capteurs de la température installés à l'intérieur de l'instrument. Une triple redondance garantit une excellente constance à long terme ainsi qu'une excellente exactitude des mesures, y compris dans les applications les plus exigeantes. Par ces techniques, les performances de chacun des capteurs sont contrôlées en permanence.

L'utilisation de baromètres numériques implique certains critères opérationnels particuliers, plus particulièrement lorsqu'ils sont employés dans des stations météorologiques automatiques. Des recommandations officielles ont été faites afin d'assurer leur bon fonctionnement (voir Annexe VII du Rapport final abrégé de la onzième session de la Commission des instruments et des méthodes d'observation météorologiques, 1994, OMM-N° 807). Les organisations météorologiques devraient :

- Contrôler et réajuster l'étalonnage des baromètres numériques au moment de la réception de ceux-ci et répéter régulièrement ces opérations (une fois par an, jusqu'à ce que le taux de dérive soit connu) ;
- Assurer un étalonnage régulier des baromètres numériques et étudier la possibilité d'utiliser à cet effet les moyens disponibles dans le pays ;
- Considérer que certains types de baromètres numériques peuvent être utilisés comme étalons voyageurs, étant donné leur facilité de transport et leur constance à court terme ;
- Considérer que la sélection d'un type particulier de baromètre numérique devrait être fonction non seulement des spécifications de l'ins-

trument, mais également des conditions environnementales et des moyens d'entretien.

Les fabricants devraient :

- a) Améliorer les baromètres numériques pour les rendre moins tributaires de la température et plus stables à long terme ;
- b) Utiliser des interfaces et des protocoles de communication normalisés pour la transmission des données ;
- c) Veiller à ce qu'un baromètre numérique puisse fonctionner sur une large gamme de tensions continues (par exemple, de 5 à 28 V).

3.3.1 Transducteurs de la déformation des capsules anéroïdes

Les instruments de précision utilisés en météorologie pour mesurer la pression évaluent sans contact la déformation d'une capsule anéroïde, ce qui est presque une nécessité. Nombreux et divers sont les transducteurs que l'on emploie dans ce but: les détecteurs de déformation à effet capacitif, les détecteurs potentiométriques, les jauge de contraintes disposées en des points précis du capteur et les systèmes asservis à équilibre de forces, grâce auxquels les dimensions du capteur demeurent constantes indépendamment de la pression.

Tous les éléments sensibles sont placés dans un boîtier moulé sous pression. Ce boîtier est conservé à température constante à l'aide d'un réchauffeur à commande électronique. Il faut y éviter toute condensation. Une bonne technique pour y parvenir consiste à insérer dans le boîtier un agent hygroskopique, tel que des cristaux de silice colloïdale, et d'empêcher la vapeur d'eau de s'y introduire en raccordant un long tube de plastique (d'environ 25 m), d'un diamètre intérieur inférieur ou égal à 2 mm, entre la prise de pression et une prise de pression statique (voir section 3.8.1).

Le boîtier du capteur de pression doit être étanche et comprendre une prise de pression extérieure.

3.3.2 Baromètres numériques piézorésistifs

Il est maintenant possible de mesurer la pression atmosphérique par l'effet piézoélectrique (effet piézorésistant). L'une des configurations souvent utilisées consiste en quatre résistances disposées sur la surface souple d'un substrat de silicium monocristallin pour former un pont de Wheatstone.

Les baromètres numériques piézorésistifs utilisent des éléments découpés dans un cristal de quartz auxquels sont appliquées des forces axiales. Ces éléments représentent un type de transducteurs de la

pression absolue. Le cristal de quartz est choisi pour ses propriétés piézoélectriques, ses caractéristiques d'oscillateur à fréquence constante, fréquence qu'il est possible de reproduire avec précision, et la faible influence de la température sur ces caractéristiques. La pression qui s'exerce par une prise extérieure soumet, par l'intermédiaire d'une capsule souple, l'élément en cristal de quartz à une force axiale ascendante et donc à une compression. Le cristal constituant une membrane rigide, c'est l'ensemble de la structure mécanique qui subit ainsi d'infimes déformations, ce qui élimine virtuellement l'hystérisis mécanique.

Le pont de Wheatstone actif dont il a été question plus haut peut être composé de jauge de contraintes semiconductrices ou de jauge piézorésistives. Les jauge de contraintes sont soit collées sur un fin diaphragme circulaire dont la circonférence est fixe, soit insérées dans la configuration du diaphragme de silicium par diffusion moléculaire. Dans ce dernier cas, la puce de silicium comprenant le circuit intégré constitue le diaphragme. La pression est répartie sur le diaphragme qui subit une tension, les contraintes résultantes étant perçues par les jauge de contrainte. Les contraintes, proportionnelles à la pression, entraînent une rupture d'équilibre au pont de Wheatstone, le signal de sortie du pont étant proportionnel à la différence nette de pression que subit le diaphragme.

Selon le principe de fonctionnement de ce type de baromètre, la pression atmosphérique agit sur l'élément capteur qui recouvre une petite capsule dans laquelle le vide a été réalisé. Par l'intermédiaire du capteur, les résistances sont soumises à des forces de tension et de compression. L'effet piézoélectrique entre alors en jeu, faisant varier la valeur des résistances en fonction de la pression atmosphérique. Afin d'éliminer les erreurs dues à la température, il est souvent incorporé un thermostat dans le capteur.

Le pont de Wheatstone, auquel est appliqué un courant continu, produit un signal de sortie qui est converti en signal standard par un amplificateur. La valeur de la pression mesurée apparaît généralement sur un affichage à diodes électroluminescentes ou à cristaux liquides.

Dans une version récente du capteur de pression à transducteur piézoélectrique, l'élément piézoélectrique présente deux fréquences de résonance. Compte tenu d'un ensemble de paramètres appropriés établis après étalonnage, un microprocesseur calcule une fonction linéaire de ces fréquences pour obtenir la pression, indépendamment de la température du capteur.

3.3.3 Baromètres à résonateur cylindrique

Dans les baromètres à résonateur cylindrique, un cylindre en alliage de nickel à paroi mince sert de capteur. Soumis à un champ électromagnétique, le cylindre est maintenu en mouvement vibratoire radial. La pression produit une variation de la fréquence de résonance propre au système mécanique vibratoire. Le mouvement de la paroi du cylindre est détecté par une bobine exploratrice dont le signal est amplifié puis renvoyé à une bobine d'excitation. La pression atmosphérique à mesurer est admise à l'intérieur du cylindre, alors que le vide servant de référence est maintenu à l'extérieur de celui-ci. La fréquence de résonance varie ainsi précisément en fonction de la tension à laquelle la paroi du cylindre est soumise en raison de la différence de pression. Quand la pression augmente, il en est de même pour la fréquence.

La rigidité et la masse du cylindre à paroi mince couvrent une gamme de mesure suffisante pour les conditions d'utilisation du baromètre. Le cylindre, monté sur un support solide, est placé dans une enceinte à vide. Pour mesurer la pression atmosphérique, l'ouverture du cylindre est reliée à l'air libre. Compte tenu de la relation à caractère unique qui existe entre la fréquence de résonance propre au cylindre et la pression, il est possible de calculer la pression atmosphérique à partir de la fréquence de résonance mesurée. Toutefois, cette relation, établie au cours de l'étalonnage de l'appareil, est fonction de la température et de la densité du gaz. Il faut donc procéder à une compensation pour la température et l'air devrait être asséché avant de parvenir à l'ouverture.

3.3.4 Lecture des baromètres électroniques

Le baromètre électronique mesure la pression atmosphérique de l'espace qui l'entoure ou de tout autre espace auquel il est relié par un tube. En général, le baromètre devrait être réglé de façon à indiquer la pression à l'altitude de l'instrument. Cependant, à bord de navires ou dans des stations terrestres situées à basse altitude, l'instrument peut être réglé de façon à indiquer la pression au niveau moyen de la mer, pourvu que la différence entre la pression à la station et la pression au niveau de la mer puisse être considérée comme constante.

Les baromètres électroniques indiquent la valeur exacte de la pression sur un afficheur numérique, normalement en hectopascals, l'unité pouvant être facilement modifiée. Il est en général possible de prévoir une sortie pour l'enregistrement des données numériques. Quand l'instrument est commandé par un microprocesseur, il peut aussi indiquer la tendance.

L'exactitude du baromètre électronique sera fonction de l'exactitude de l'étalonnage, de l'efficacité de la compensation pour la température (méthode de l'air résiduel, mesure de la température et correction, utilisation d'un thermostat) et de la dérive instrumentale.

Aux transducteurs primaires, il est possible d'adapter des circuits capables d'apporter au signal primaire les corrections des erreurs de linéarité du capteur et des effets de la température, et capables aussi de convertir le signal primaire en unités du système recommandé. Le modèle type du baromètre moderne comprend un capteur, un microprocesseur (avec un afficheur) et une interface pour coupler l'appareil à un enregistreur de données ou à une station météorologique automatique.

Les baromètres équipés de plusieurs transducteurs ou capteurs calculent en général la moyenne pondérée des valeurs fournies et indiquent le résultat avec une résolution de 0,1 hPa. Au cours de l'étalonnage, il est possible de vérifier à 0,01 hPa près les valeurs mesurées par chacun des capteurs, ce qui ne doit pas porter les opérateurs à penser que la justesse de l'instrument est meilleure que 0,1 hPa (voir section 3.10.3.4).

3.3.5 Erreurs et défauts des baromètres électroniques

3.3.5.1 Dérive de l'instrument par rapport à l'étalonnage

Il s'agit là de l'une des sources principales d'erreur pour les baromètres électroniques. Cette dérive, relativement élevée quand l'instrument est neuf, a souvent tendance à s'estomper avec le temps. Il peut arriver que l'instrument s'écarte brusquement du réglage obtenu par étalonnage.

Pour que les caractéristiques de fonctionnement du baromètre demeurent acceptables, il convient de contrôler assez fréquemment, tous les ans par exemple, les facteurs d'étalonnage à appliquer aux mesures pour les corriger. Il est ainsi possible de déceler toute défectuosité et de remplacer le capteur à temps.

La nécessité de vérifier fréquemment les baromètres électroniques impose une charge supplémentaire aux Services météorologiques nationaux, surtout à ceux qui disposent de grands réseaux d'observation. Il faut tenir compte des frais permanents que cela représente lorsqu'on envisage de remplacer des baromètres à mercure par des baromètres électroniques.

3.3.5.2 Température

Les baromètres électroniques doivent être conservés à température constante pour éviter une dérive. Il est en outre préférable que, dans les conditions d'exploitation, la température soit proche de la température d'étalonnage. Il faut cependant déplorer que beaucoup de baromètres électroniques disponibles dans le commerce ne comportent pas de système de compensation pour la température et qu'ils sont donc sujets à des erreurs importantes. Dans la plupart des cas, l'instrument mesure avec exactitude la température du capteur de pression et corrige par l'électronique la valeur de la pression. Selon cette méthode, le capteur du baromètre ne doit pas être affecté par un gradient thermique. Quand la température varie assez rapidement, il peut se produire des erreurs d'hystérésis pendant un court laps de temps.

Il existe un rapport étroit entre la dérive de l'instrument et les températures auxquelles il a été soumis au cours de son fonctionnement. Quand le baromètre est exposé longtemps à des températures différentes de celle pour laquelle il est étalonné, il peut s'ensuivre des dérives à moyen ou long terme.

L'électronique du baromètre est également source d'erreurs si elle n'est pas maintenue à la même température que le capteur. On utilise très souvent les baromètres électroniques dans des conditions climatiques extrêmes, en particulier dans les stations météorologiques automatiques. Dans de tels cas, les baromètres risquent d'être exposés à des températures pour lesquelles ils n'ont été ni conçus ni étalonnés.

3.3.5.3 Interférences électriques

Comme c'est le cas pour tous les appareils de mesure électroniques sensibles, il convient de protéger les baromètres électroniques par un blindage et de les tenir éloignés des sources de champs magnétiques importants, telles que les transformateurs, les ordinateurs, les radars, etc. Bien que les problèmes ne soient pas fréquents, il peut survenir une augmentation du bruit qui cause une diminution de l'exactitude de l'instrument.

3.3.5.4 Différences de fonctionnement

Des variations sensibles de la justesse du baromètre électronique peuvent se produire quand le fonctionnement de l'instrument en exploitation est différent de son fonctionnement au moment de l'étalonnage. Précisons qu'un instrument fonctionnant en continu ne refroidit pas et n'indiquera donc pas la même pression qu'un instrument dont l'affichage est renouvelé à intervalle de quelques secondes.

3.4

BAROMÈTRES ANÉROÏDES

3.4.1

Caractéristiques essentielles

Le baromètre anéroïde a sur le baromètre à mercure le grand avantage d'être portatif et peu encombrant, ce qui le rend particulièrement pratique pour l'emploi en mer ou sur le terrain. Les parties essentielles d'un baromètre anéroïde sont une chambre métallique fermée, à l'intérieur de laquelle on a fait un vide complet ou partiel, et un robuste système de ressorts qui empêche la chambre de s'affaisser sous la pression atmosphérique extérieure. À toute pression donnée, il y aura un équilibre entre la force exercée par le ressort et la force exercée par la pression extérieure.

La chambre anéroïde peut être faite d'un matériau (acier ou cuivre au beryllium) qui a des propriétés d'élasticité telles que la chambre fait elle-même office de ressort.

Il faut pouvoir déceler et afficher les changements de défexion qui surviennent. Le moyen utilisé peut être un système de leviers qui amplifie la défexion et déplace une aiguille sur une échelle graduée pour indiquer la pression. On peut aussi faire dévier un rayon de lumière sur l'échelle. Au lieu de ces systèmes mécaniques analogiques, certains baromètres possèdent un micromètre manuel dont le compteur indique la pression directement en dixièmes d'hectopascal. Pour faciliter la lecture, un indicateur lumineux signale quand le micromètre entre en contact avec la chambre anéroïde. Ce type de baromètre anéroïde est portatif et résistant.

3.4.2

Exactitude requise

Les principales caractéristiques d'un bon baromètre anéroïde sont les suivantes :

- a) Il devrait être compensé pour la température de façon que les lectures ne varient pas de plus de 0,3 hPa pour un changement de température de 30 K ;
- b) Les erreurs d'échelle à un point quelconque ne devraient pas excéder 0,3 hPa et devraient rester dans les limites de cette tolérance pour des périodes d'au moins un an dans des conditions normales d'emploi ;
- c) L'hystérésis devrait être assez faible pour que la différence entre les lectures effectuées avant un changement de pression de 50 hPa et après le retour à la valeur initiale n'excède pas 0,3 hPa ;
- d) Il devrait être capable de supporter les risques ordinaires de transport sans que celui-ci cause des inexactitudes en dehors des limites spécifiées ci-dessus.

3.4.3 Lecture des baromètres anéroïdes

3.4.3.1 Exactitude de la lecture

Le baromètre anéroïde devrait toujours être lu dans la même position (verticale ou horizontale) qu'au moment de son étalonnage. On devrait le tapoter avant la lecture et, autant que possible, le lire au plus proche 0,1 hPa. Il existe des dispositifs optiques et numériques qui permettent d'augmenter la justesse de la lecture et de réduire les erreurs causées par le fonctionnement des leviers mécaniques.

3.4.3.2 Corrections des lectures du baromètre anéroïde

En général, le baromètre anéroïde devrait être réglé de façon à indiquer la pression à l'altitude de l'instrument. Cependant, à bord de navires ou dans les stations terrestres situées à basse altitude, l'instrument peut être réglé de façon à indiquer la pression au niveau moyen de la mer, pourvu que la différence entre la pression à la station et la pression au niveau de la mer puisse être considérée comme constante. Les erreurs instrumentales devraient être corrigées, mais on estime habituellement que l'instrument est suffisamment compensé pour la température et il n'a pas besoin d'être corrigé pour l'accélération de la pesanteur.

3.4.4 Erreurs et défauts des baromètres anéroïdes

3.4.4.1 Compensation incomplète pour la température

Dans un baromètre anéroïde, l'affaiblissement du ressort provoqué par l'augmentation de la température conduit l'instrument à surestimer la valeur de la pression. Cet effet est généralement compensé de l'une des façons suivantes :

- a) Au moyen d'une tige bimétallique dans le système de leviers ;
- b) En laissant une certaine quantité d'air à l'intérieur de la chambre anéroïde.

Dans la plupart des baromètres anéroïdes ordinaires, la compensation obtenue par ces méthodes n'est complète qu'à une pression particulière de compensation. Il est à souhaiter que tous les baromètres et les barographes anéroïdes utilisés dans les stations météorologiques soient bien compensés pour la température sur toute l'échelle des pressions. Dans les systèmes numériques de lecture qui se prêtent à l'automatisation, des corrections complètes sont réalisées par l'électronique.

3.4.4.2 Erreurs d'élasticité

Si un baromètre anéroïde est soumis à une variation rapide et ample de la pression suivie d'un retour plus

progressif à la valeur initiale, par exemple au cours d'une forte rafale de vent, l'instrument indiquera une pression légèrement différente de la pression vraie, en raison de l'hystérosis; il peut s'écouler un laps de temps considérable avant que cette différence devienne négligeable. Comme les baromètres et barographes anéroïdes de surface ne sont pas, en général, exposés directement à de grandes variations de pression, les erreurs qu'ils commettent de ce fait restent modérées.

Les modifications lentes des propriétés du métal de la capsule anéroïde génèrent également une erreur séculaire. Cet effet ne peut être évalué que par le biais de comparaisons périodiques, tous les ans par exemple, avec un baromètre étalon. Un bon baromètre anéroïde devrait conserver une exactitude de 0,1 hPa durant un an ou plus. Il convient, afin de déceler les instruments qui viendraient à accuser des écarts plus grands, d'instaurer une procédure de vérification régulière comprenant un étalonnage et les ajustements nécessaires.

3.5 BAROGRAPHES

3.5.1 Caractéristiques générales

Il existe différents types de barographes, mais nous ne traiterons ici en détail que du barographe anéroïde. S'agissant des diagrammes des instruments utilisés à des fins synoptiques, il est recommandé :

- a) Qu'ils soient gradués en hPa ;
- b) Qu'ils soient lisibles à 0,1 hPa près ;
- c) Que l'échelle de la graduation soit de 1,5 cm pour 10 hPa.

De plus, les caractéristiques suivantes sont souhaitables dans un barographe :

- a) Sa capsule anéroïde devrait être de première qualité (voir section 3.5.2) ;
- b) Il devrait être compensé pour la température de façon que la lecture ne varie pas de plus de 1 hPa pour un changement de température de 20 K ;
- c) Les erreurs d'échelle ne devraient en aucun point excéder 1,5 hPa ;
- d) L'hystérosis devrait être assez faible pour que la différence entre les lectures effectuées avant un changement de pression de 50 hPa et après le retour à la valeur initiale n'excède pas 1 hPa ;
- e) Il devrait y avoir un dispositif pour marquer le temps qui permette de faire les marques sans soulever le couvercle ;
- f) Le style porte-plume devrait pivoter sur une «charnière» dont l'axe soit incliné de telle fa-

çon que la plume repose sur le diagramme par l'effet de la pesanteur. Un moyen d'ajustement devrait être prévu pour régler la position de la plume.

Les barographes de marine doivent présenter certaines caractéristiques spéciales qui sont examinées dans le chapitre 4 de la Partie II du présent Guide.

3.5.2 Construction de barographes

Le principe de fonctionnement du barographe anéroïde est analogue à celui du baromètre anéroïde, si ce n'est qu'un style enregistreur remplace l'aiguille du baromètre. Le modèle des capsules superposées s'en trouve légèrement modifié, ce qui se traduit en général par une augmentation du nombre et de la taille des capsules utilisées et par une diminution de l'amplification totale de la flexion.

Pour vérifier l'effet que peut avoir la friction sur le relevé détaillé de la pression, on peut considérer la force qu'il faut appliquer au style pour le déplacer d'une unité de l'échelle (1 hPa), à laquelle devrait être égale la force qu'il faudrait appliquer pour empêcher le style de se déplacer quand la pression varie de 1 hPa.

La force à appliquer pour compenser le déplacement du fond de la capsule lorsque la pression varie de 1 hPa est égale à $100 A$ newtons, où A représente la surface de la section transversale de la capsule en mètres carrés. Si le facteur d'amplification est X , la force nécessaire pour empêcher le style de se déplacer est de $100 A/X$ newtons et varie en fonction de A/X . Pour un type de capsule et une valeur d'échelle donnée, la valeur de X est en grande partie indépendante de celle de A ; par conséquent, on peut considérer que l'asservissement de la plume du barographe varie approximativement avec la surface de la section transversale de la capsule.

3.5.3 Sources d'erreurs et inexactitude

En plus des erreurs mentionnées pour les baromètres anéroïdes (voir section 3.4.4), la friction entre la plume et le papier est importante. L'asservissement de la plume dépend pour une grande part de la section transversale de la capsule anéroïde. Dans un barographe bien construit, la friction de la plume est sensiblement plus forte que la friction totale de tous les pivots et coussinets de l'instrument; une attention spéciale devrait donc être portée à la réduction de telles erreurs, par exemple en ayant une capsule anéroïde suffisamment grande.

Un barographe de première qualité devrait présenter une incertitude d'environ 0,2 hPa, corrections faites,

et la conserver durant un mois ou deux. La variation barométrique lue sur un tel barographe devrait habituellement être obtenue dans les mêmes limites.

3.5.4 Instruments capables de traiter les données

Un baromètre convenant à la lecture automatique peut être relié à un dispositif de calcul, habituellement un microprocesseur, qui peut être programmé pour fournir des données représentatives qu'il est possible de présenter sous forme de graphiques, en vue d'établir des relevés similaires à ceux fournis par un barographe. Certains modèles impriment leurs propres échelles, ce qui élimine ainsi une source d'erreur.

3.5.5 Lecture des barographes

Il faut pouvoir lire le barographe sans le toucher. Le marquage du temps et toute inspection de l'instrument amenant à soulever le couvercle, entre autres, devraient toujours se faire après que la lecture est terminée.

3.5.5.1 Exactitude de la lecture

Le diagramme devrait être lu au plus proche dixième d'hectopascal. La variation barométrique devrait être obtenue dans les mêmes limites.

3.5.5.2 Corrections des lectures du barographe

La correction de température de tout instrument devrait être vérifiée avant que l'instrument ne soit utilisé et le facteur d'échelle devrait être ajusté par contrôle dans une cloche à vide. Si le barographe n'est utilisé que pour déterminer la variation barométrique, aucune correction n'est généralement appliquée aux lectures. Dans ce cas, un réglage exact de la position de la plume n'est pas important. Lorsque le barographe sert à obtenir des valeurs absolues de la pression, le relevé devrait être comparé avec les lectures corrigées d'un baromètre à mercure ou d'un bon baromètre anéroïde au moins une fois toutes les 24 h, et les valeurs désirées déterminées par interpolation.

3.6 BAROMÈTRES DE BOURDON

Le baromètre à tube de Bourdon contient habituellement un capteur dont la forme varie selon les changements de pression, comme dans le cas d'une capsule anéroïde, ainsi qu'un transducteur qui transforme les variations de forme pour les rendre directement utilisables par l'observateur. Le dispositif d'affichage des résultats peut être éloigné du capteur. Les laboratoires d'étalonnage utilisent des

baromètres numériques précis et stables, renfermant des tubes de quartz, comme étalons de travail ou de référence.

3.7 VARIATION BAROMÉTRIQUE

Les stations effectuant des observations au moins toutes les 3 h ont le choix entre deux méthodes :

- a) La variation peut être lue sur le barographe ;
- b) La variation peut être déterminée d'après les lectures appropriées du baromètre, corrigées au niveau de la station. Si l'on dispose d'un baromètre à mercure ordinaire et d'un barographe de première qualité à grande échelle, ce dernier devrait être choisi pour les raisons exposées ci-dessous.

L'erreur d'une seule lecture barométrique est essentiellement aléatoire, à condition que l'instrument soit en parfait état de fonctionnement. Par conséquent, les erreurs peuvent s'additionner quand on soustrait deux lectures l'une de l'autre afin d'obtenir la valeur de la variation. Les erreurs du barographe sont en partie de nature systématique, de sorte que, pendant la période relativement courte de 3 h, elles auront probablement le même signe et seront donc réduites par la soustraction.

Une autre raison d'utiliser le barographe est qu'il n'est pas nécessaire de corriger les lectures au niveau de la station. Il est, dans tous les cas, obligatoire de l'employer pour déterminer la caractéristique de la variation barométrique.

Les baromètres à affichage numérique se révèlent également très utiles pour déterminer l'amplitude et la caractéristique des variations de pression.

3.8 CONDITIONS GÉNÉRALES D'EXPOSITION

Il est important de choisir avec grand soin l'emplacement du baromètre à la station d'observation. Les conditions suivantes doivent être remplies: une température uniforme, un bon éclairage, un milieu protégé des courants d'air, une monture verticale solide et une protection contre un maniement brusque. L'instrument devra par conséquent être suspendu ou placé dans une salle dont la température est constante ou varie lentement, et dans laquelle des gradients de température ne peuvent se produire. Il devrait être protégé à tout moment contre les rayons directs du soleil et ne devrait pas être placé à proximité d'un appareil de chauffage ni dans un courant d'air.

3.8.1 Effet du vent

Tous les types de baromètre sont sensibles aux effets du vent. On trouvera de plus amples renseignements à ce sujet dans Liu et Darkow (1989).

Un baromètre ne donnera pas d'indication correcte de la pression statique s'il est influencé par des rafales de vent. Ses indications varieront avec la vitesse et la direction du vent, et avec la grandeur et le signe des variations, dépendant également de la nature des ouvertures de la salle et de leur position par rapport à la direction du vent. En mer, l'erreur existe toujours en raison du mouvement du navire. Un problème analogue se présente si le baromètre est installé dans un local climatisé.

Le vent peut souvent causer des variations dynamiques de la pression dans la pièce où est placé le baromètre. Ces fluctuations se superposent à la pression statique; par vent fort soufflant en rafales, elles peuvent atteindre 2 à 3 hPa. Il est en général impossible d'effectuer la correction pour de telles fluctuations, l'effet de «pistonnage» sur la surface du mercure dépendant à la fois de la direction et de la force du vent, ainsi que des conditions locales dans lesquelles est placé le baromètre, si bien que la «valeur moyenne» ne représente même pas la pression statique vraie. Lorsqu'on compare deux baromètres installés dans des bâtiments distincts, il convient de se rappeler que l'effet du vent peut provoquer une différence entre les lectures.

Il est possible, dans une très grande mesure, de réduire cet effet en plaçant une prise de pression statique entre l'atmosphère extérieure et la prise du capteur. Plusieurs publications exposent en détail les principes de fonctionnement des prises de pression statique (Miksad, 1976; United States Weather Bureau, 1963). Dans le cas d'un baromètre à mercure, il s'agit de rendre la cuvette étanche à l'air, à l'exception d'un conduit relié à une prise d'air spéciale placée à l'extérieur et réalisée de manière à assurer une pression interne égale à la véritable pression statique. En général, les baromètres anéroïdes et électroniques sont équipés d'un branchement simple pour une prise de pression statique; celle-ci doit être placée dans un milieu ouvert, où elle ne sera pas affectée par la proximité de bâtiments. Sa conception demande beaucoup d'attention. Des prises de pression statique sont vendues dans le commerce, mais aucun texte n'a été publié sur leur performance relative.

3.8.2 Effet de la climatisation

La climatisation peut entraîner une importante différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un local. En conséquence, si le baromètre est placé

dans une pièce climatisée, il est conseillé d'y adapter une prise de pression statique qui le relie à l'extérieur du bâtiment.

3.9 EXPOSITION DES BAROMÈTRES

3.9.1 Exposition des baromètres à mercure

Aux conditions générales d'exposition du baromètre à mercure déjà décrites viennent s'ajouter les points exposés ci-après. Il est toujours préférable de suspendre un baromètre à mercure contre un mur intérieur. Pour des mesures très précises, la meilleure installation consisterait en une pièce de sous-sol sans fenêtre et non chauffée, équipée d'un petit ventilateur afin d'empêcher toute stratification de la température.

Il est conseillé d'utiliser la lumière artificielle pour toutes les observations, afin d'obtenir des conditions d'éclairage uniformes pour la lecture du baromètre. À cette fin, on peut prévoir un dispositif quelconque d'éclairage pouvant créer pour le ménisque du mercure et, au besoin, pour la pointe de référence un arrière-plan blanc et faiblement lumineux. Si l'on n'emploie pas de dispositif d'éclairage, il faudra veiller à munir le ménisque et la pointe de référence d'un arrière-plan clair au moyen de plaques de verre laiteux, de Celluloïd blanc ou d'une feuille de papier blanc. Une source de lumière artificielle devrait aussi être prévue pour la lecture de l'échelle du baromètre et de son thermomètre. Il faut toutefois prendre garde de ne pas réchauffer le baromètre par la lumière artificielle pendant la lecture.

Le baromètre devrait être installé à un endroit où il ne subit pas de vibrations, de préférence contre un mur plein. La colonne de mercure doit être en position verticale. Les erreurs dues à son écartement de la verticale sont plus importantes quand il s'agit d'un baromètre asymétrique. Un tel baromètre devrait être monté avec son axe le plus long à la verticale, de telle sorte que le réglage de la surface du mercure à la pointe de référence demeure exact lorsque l'instrument est incliné.

Afin de protéger le baromètre des manipulations brusques, de la poussière et des courants d'air, il est recommandé de le placer dans une boîte munie d'une porte à charnières et suffisamment ventilée pour que l'air ne s'y stratifie pas.

Le déplacement d'un baromètre à mercure exige de grandes précautions. La méthode la plus sûre est de transporter le baromètre à l'envers dans un coffret de bois muni d'une bretelle. Si une personne qualifiée ne peut accompagner le baromètre pendant le trans-

port, celui-ci devrait être expédié, la cuvette vers le haut, dans une caisse convenablement suspendue au moyen de ressorts. Le baromètre ne devrait pas être soumis à des mouvements violents et doit toujours être retourné très lentement. Il convient de prendre des précautions spéciales pour quelques types spéciaux de baromètres avant de les retourner.

3.9.2 Exposition des baromètres électroniques

Le baromètre électronique nécessite une atmosphère propre et sèche, exempte de substances corrosives. L'instrument doit être tenu à une température constante (voir section 3.3.5.2). Il doit être monté de manière à être protégé des chocs et des vibrations mécaniques. Il faut aussi le positionner loin des sources électromagnétiques; si cela est impossible, il convient d'utiliser des câbles et un boîtier blindés.

Il y a lieu d'installer les baromètres à affichage numérique dans un endroit suffisamment éclairé, mais pas face à une fenêtre ou à une autre source lumineuse trop forte.

3.9.3 Exposition des baromètres anéroïdes

Les conditions d'exposition des baromètres à mercure (voir section 3.9.1) s'appliquent aussi aux baromètres anéroïdes, compte tenu de la compensation imparfaite des effets de la température propre à ces instruments. Il est préférable de monter le baromètre dans un emplacement où la température demeure relativement uniforme tout au long de la journée, c'est-à-dire qu'il doit être protégé des rayons directs du soleil et des sources de chaleur ou de froid pouvant entraîner des variations brusques et marquées de sa température.

Aux stations terrestres, il est bon d'installer le baromètre anéroïde près d'un baromètre à mercure afin de faciliter la comparaison et l'étalonnage (voir section 3.10).

3.9.4 Exposition des barographes

Un barographe devrait être installé de façon à être protégé des changements brusques de température, des vibrations et de la poussière. Il ne devrait pas être exposé directement à la lumière solaire. Il devrait se trouver à un emplacement difficilement accessible à des personnes non autorisées. Placer le barographe sur un coussin en caoutchouc mousse est un moyen pratique de réduire les effets des vibrations. L'endroit choisi devrait être propre et sec; l'air devrait être relativement exempt de substances risquant d'entraîner la corrosion, le blocage du mécanisme ou d'autres problèmes.

Il importe d'installer le barographe à une hauteur correspondant au niveau des yeux afin de faciliter la lecture dans les conditions normales de fonctionnement et de réduire l'erreur de parallaxe. L'exposition devrait être telle qu'elle offre des conditions d'éclairage uniformes, un éclairage artificiel étant prévu au besoin.

Si un barographe doit être transporté à haute altitude, par voie aérienne notamment, il convient de débrancher le style et de prendre des précautions pour que le mécanisme soit capable de supporter la surcharge causée par le dépassement de la portée normale de l'instrument.

3.10 COMPARAISON, ÉTALONNAGE ET ENTRETIEN

3.10.1 Conditions générales s'appliquant aux comparaisons de baromètres

Étant donné l'importance que revêt l'exactitude des observations de la pression, spécialement de celles qui sont destinées à la météorologie synoptique et à l'aéronautique, et les diverses possibilités d'erreurs auxquelles sont sujets les baromètres à mercure, tous les baromètres de station devraient être vérifiés régulièrement par un inspecteur. Quelques directives sont données dans les sections suivantes sur l'équipement à utiliser pour les vérifications, sur la fréquence des vérifications ainsi que sur diverses questions connexes. Lorsque des baromètres anéroïdes de précision sont utilisés comme baromètres de station, il y a lieu de les vérifier fréquemment (au moins une fois par semaine) par comparaison avec un baromètre à mercure. Il faut consigner les résultats de toutes ces vérifications sur un support approprié ou dans un registre spécial.

Toutefois, on peut se dispenser d'utiliser un baromètre à mercure si l'on fait une comparaison quotidienne tant avec les lectures d'un second baromètre anéroïde installé à la station qu'avec l'analyse des pressions relevées dans les environs de la station. Cette démarche devrait être appuyée par des contrôles semestriels à l'aide d'un étalon voyageur.

La distinction entre les différentes catégories de baromètres utilisés dans un Service météorologique national peut être faite à l'aide des symboles ci-après :

- A : Baromètre étalon, primaire ou secondaire, capable à lui seul d'indiquer la pression avec une incertitude de 0,05 hPa ou moins ;
- B : Baromètre étalon de travail dont la conception se prête à des comparaisons barométriques courantes et pour lequel les erreurs ont été

préalablement déterminées par comparaison avec un étalon primaire ou secondaire ;

- C : Baromètre étalon de référence utilisé pour les comparaisons des étalons voyageurs et des baromètres des stations principales d'un Service météorologique national ;
- S : Baromètre (à mercure, anéroïde, électronique) d'une station météorologique ordinaire ;
- P : Baromètre à mercure de bonne qualité et de grande exactitude, pouvant être transporté d'une station à une autre sans que son étalonnage en soit modifié ;
- N : Baromètre anéroïde de précision, portatif et d'excellente qualité ;
- Q : Baromètre numérique de précision, portatif et d'excellente qualité, à utiliser comme étalon-voyageur (Q signifiant qualité) ;
- M : Microbarographe portatif, de bonne qualité et de grande exactitude.

Afin que les programmes de comparaison de baromètres conduits par tous les Services météorologiques nationaux aient la même base de référence, il est souhaitable d'observer des règles uniformes en ce qui concerne la qualité des équipements utilisés, la fréquence des comparaisons, les procédures à suivre, les tolérances dans la correction du zéro et les critères déterminant les mesures correctives à prendre.

3.10.2 Instruments utilisés dans les comparaisons de baromètres

3.10.2.1 Baromètre étalon primaire

Les opinions varient quant au meilleur type de baromètre à utiliser comme étalon primaire. Deux types sont présentés dans les paragraphes suivants.

Il est possible d'utiliser un appareil d'essai à contrepoids qui fournit une pression étalonnée en fonction des masses utilisées et du champ de gravité local. Son emploi est relativement simple et exempt du problème de dérive excessive qui afflige les baromètres à mercure dans un milieu pollué.

Il peut s'agir aussi d'un baromètre à mercure de grande qualité spécialement construit dans ce but. Un tel baromètre doit contenir du mercure de grande pureté et de masse volumique connue, maintenu sous vide poussé et à une température constante, dans un milieu préservé de la pollution. Le baromètre doit être doté d'une échelle étalonnée et d'un mécanisme optique de lecture. Ce type de baromètre mesure la pression absolue avec une grande exactitude, tandis que l'appareil à contrepoids fournit une pression étalonnée.

3.10.2.2 Baromètre étalon de travail

Les étalons de travail et de référence, ainsi que les étalons voyageurs utilisés pour comparer les baromètres, devraient avoir une grande constance pendant de longues périodes. Il peut s'agir soit de baromètres à mercure soit de baromètres électroniques. Dans le cas des baromètres à mercure, le diamètre intérieur du tube devrait être de 12 mm au moins. Il est également souhaitable que le vide puisse être contrôlé dans le tube. Enfin, toutes les erreurs ayant été décelées à la suite de deux comparaisons récentes au moins de ces instruments avec des baromètres d'une catégorie supérieure devraient être entièrement et soigneusement corrigées.

3.10.2.3 Baromètre étalon voyageur

Un étalon voyageur est jugé sûr si la correction de son zéro ne varie pas de plus de 0,1 hPa pendant son transport. Il devrait être étalonné avant et après chaque déplacement, par comparaison à un baromètre étalon de travail ou de référence. Une fois étalonné avant un déplacement, il ne devrait en aucun cas être ouvert ou réglé tant qu'il n'a pas fait l'objet d'une comparaison à son retour à la station de départ. Les baromètres étalons voyageurs sont transportés dans un étui protecteur solide et bien rembourré.

Avant d'entreprendre un déplacement, il est recommandé de vérifier soigneusement le baromètre à mercure qui sert d'étalon voyageur, afin de s'assurer de la propreté du mercure contenu dans le tube et dans la cuvette, de l'absence de bulles d'air dans le tube et d'un bon maintien du vide dans la chambre barométrique au-dessus du mercure. La manipulation, l'emballage et le transport des étalons voyageurs nécessitent beaucoup de soins pour éviter autant que possible toute variation, aussi faible soit-elle, de la correction du zéro. Il faut éviter les mouvements brusques et saccadés qui peuvent entraîner la formation, dans la cuvette, de bulles d'air qui s'élèvent ensuite dans le tube. Les baromètres à mercure doivent être transportés dans un étui en cuir ou en métal bien rembourré, en maintenant la cuvette toujours plus haut que le tube.

3.10.2.4 Spécifications du baromètre à mercure portatif (P)

Lorsqu'un baromètre à mercure est utilisé comme baromètre de la catégorie P, il doit être construit de telle sorte que le vide de la chambre barométrique puisse être vérifié ou obtenu en reliant le sommet du tube à une pompe à vide. Il est essentiel que la chambre barométrique soit fermée de manière hermétique par une valve de contrôle. Le diamètre intérieur du tube ne devrait pas être inférieur à 12 mm. L'instrument devrait être caractérisé par une

grande constance pendant de longues périodes. Il est souhaitable, en outre, qu'il comporte un dispositif permettant de déterminer si la quantité de mercure contenue dans la cuvette n'a pas varié depuis le moment où celle-ci a été remplie pour la première fois.

La seconde préférence dans le choix de l'instrument devant servir de baromètre étalon voyageur doit être donnée à un baromètre robuste du type Fortin dont le tube ait un diamètre intérieur d'au moins 9 mm et si possible de 12 mm. Le degré d'exactitude (en ce qui concerne la répétabilité) indispensable dans le cas d'un étalon voyageur est de l'ordre de 0,1 hPa. Les baromètres de la catégorie P devraient être étalonnés pour une grande étendue de valeurs de pression et de température, correspondant à celles pouvant être effectivement rencontrées.

3.10.2.5 Spécifications du baromètre électronique portatif (P)

Les baromètres électroniques portatifs ont atteint un degré de perfectionnement et de fiabilité tel qu'il est possible de les utiliser comme instruments de la catégorie P. Le baromètre doit avoir montré une bonne fiabilité pendant une longue période et n'avoir subi que de faibles corrections déterminées au cours de plusieurs comparaisons avec un baromètre étalon durant une année au moins et sur toute la gamme des pressions que le baromètre doit pouvoir mesurer.

Il est préférable d'utiliser les baromètres électroniques à plusieurs transducteurs de pression commandés indépendamment par microprocesseur. Le mécanisme de compensation pour la température doit avoir fait la preuve de sa justesse. Le mesurage à partir du transducteur de pression doit se faire sans contact et le baromètre proprement dit doit être suffisamment robuste pour résister aux chocs susceptibles de survenir pendant le transport.

3.10.3 Comparaison de baromètres

3.10.3.1 Comparaisons internationales de baromètres

Les comparaisons internationales de baromètres revêtent une grande importance car, sans elles, il serait impossible de garantir l'uniformité des normes nationales auxquelles doivent répondre les instruments de mesure de la pression et, par conséquent, l'homogénéité des données barométriques à l'échelle mondiale. L'OMM a organisé une comparaison des baromètres numériques automatiques à De Bilt (Pays-Bas) de 1989 à 1991. La section 3.10.4 expose la procédure qu'il est recommandé de suivre pour ces comparaisons.

Le programme des comparaisons comprend :

- a) La comparaison, au moins une fois tous les deux ans, de l'étalon national de travail B avec un baromètre étalon A, primaire ou secondaire. Si les étalons A et B se trouvent dans le même centre, l'emploi d'étalons voyageurs est inutile ;
- b) La comparaison, au moins une fois tous les deux ans, de l'étalon de référence C avec l'étalon national de travail B, à l'aide d'étalons voyageurs ;
- c) La comparaison, au moins une fois par an, du baromètre de station S avec l'étalon de référence C à l'aide d'étalons voyageurs, ou avec l'étalon de travail B à intervalle d'un ou deux ans, en fonction des caractéristiques des baromètres utilisés. Selon le principe adopté, la comparaison se déroule soit à la station soit dans un centre équipé à cet effet, l'utilisation d'étalons voyageurs s'avérant alors inutile.

Bien entendu, l'erreur relevée pour chaque baromètre après chaque intervention dans la série des comparaisons est déterminée par rapport au baromètre étalon A, primaire ou secondaire, de manière que les lectures barométriques corrigées aient une base de référence absolue, quel que soit le niveau auquel l'intervention est effectuée.

3.10.3.2 Inspection des baromètres de station

L'inspection des baromètres de station peut être faite à l'aide de baromètres Fortin ayant un tube de 9 mm de diamètre intérieur, sans négliger les restrictions imposées quant au transport d'instruments renfermant du mercure (voir section 3.2.7.3). Des baromètres anéroïdes ou électroniques de précision peuvent aussi être utilisés comme étalons voyageurs s'ils ont la constance et l'exactitude requises. Il est recommandé d'utiliser au moins trois de ces instruments à la fois afin de pouvoir déceler immédiatement le mauvais fonctionnement de l'un d'eux. Un baromètre anéroïde utilisé à cette fin ne doit pas être sensible aux effets d'hystérésis. Il devrait en outre avoir un coefficient de température négligeable. De telles caractéristiques ne peuvent être obtenues que sous certaines conditions quant à la conception et aux alliages utilisés. Pour qu'un instrument de ce genre puisse être jugé satisfaisant, il est indispensable que le système indicateur n'appuie jamais sur la capsule anéroïde. Les baromètres à sortie numérique, pour autant qu'ils aient une bonne constance, sont très commodes comme étalons voyageurs.

3.10.3.3 Procédure de comparaison des baromètres à mercure

Les instructions données dans les sections précédentes devraient, de manière générale, être respectées. Toutes les précautions normales lors du réglage des baromètres et de la lecture de la pression

devraient faire l'objet d'une attention particulière. Des études ont montré qu'en prenant les précautions nécessaires, il est normalement possible de faire des lectures comparatives avec une exactitude moyenne de 0,05 hPa.

Les relevés comparatifs des baromètres devraient être notés sur des imprimés appropriés. Un état permanent de tous les contrôles effectués devrait être attaché à chaque instrument et comporter, notamment, la date de chaque vérification, la température et la pression relevées lors de chaque comparaison, et les corrections obtenues.

Les comptes rendus des comparaisons de baromètres devraient être transmis à la direction du Service météorologique national qui évaluera les erreurs, calculera et communiquera les corrections nécessaires et déterminera s'il y a lieu de prendre des dispositions en vue de remédier aux insuffisances constatées. Un état permanent des relevés comparatifs devrait être conservé avec soin pour chaque baromètre de station afin que les performances de l'instrument puissent être étudiées sur plusieurs années et que ses défauts éventuels puissent être décelés. Pour le programme de contrôle de qualité des baromètres, les relevés peuvent être établis sous forme de tableaux ou de graphiques.

3.10.3.4 Vérification des baromètres électroniques

Compte tenu de leur degré actuel de perfectionnement, il importe d'étalonner les baromètres électroniques à intervalle d'un an environ. Il est normal d'apporter un baromètre électronique dans un centre d'étalonnage immédiatement avant de l'envoyer dans une station d'observation météorologique. À la station, plusieurs relevés comparatifs devraient être exécutés pendant plusieurs jours entre le baromètre électronique et l'étalon voyageur. Les baromètres étant installés à la même hauteur, ces relevés devraient avoir lieu dans les conditions suivantes: vitesse du vent inférieure à 12 m s^{-1} et pression constante ou variant de moins de 1 hPa h^{-1} . Tout baromètre électronique devrait être considéré comme inutilisable et renvoyé au centre d'étalonnage pour un nouvel étalonnage si la différence moyenne des relevés par rapport à l'étalon voyageur est supérieure à $0,25 \text{ hPa}$.

Dans la mesure du possible, il est conseillé d'installer deux baromètres électroniques distincts à la station d'observation météorologique. L'un d'entre eux devrait, de préférence, avoir présenté une dérive faible pendant une longue période. Le personnel du centre d'étalonnage est chargé de déterminer à partir des résultats des étalonnages antérieurs quels sont les baromètres à dérive faible. Lorsqu'une station reçoit un nouveau baromètre, un ensemble de

relevés comparatifs sont exécutés, comme cela est décrit plus haut, et on établit la différence moyenne entre le baromètre à faible dérive et le nouveau baromètre. Par la suite, la pression devrait être relevée chaque jour sur les deux baromètres et le total cumulé de 25 différences devrait être calculé. En cas de différence de dérive entre le nouveau baromètre et le baromètre à faible dérive, les sommes des 25 différences varieront. Lorsqu'une station est équipée d'un baromètre à mercure et d'un baromètre électronique, il est normal de prendre pour baromètre à dérive faible le baromètre à mercure. Le fait que la dérive est effectivement faible devrait néanmoins être vérifié par des contrôles réguliers.

Ces contrôles ne tiennent lieu ni d'inspection, ni de nouvel étalonnage en ce qui concerne le baromètre électronique. Chaque Service météorologique national devrait établir des procédures détaillées pour l'inspection et l'étalonnage des baromètres électriques, en se fondant à titre pratique sur la méthode proposée ci-dessus.

3.10.4 Procédure générale recommandée pour la comparaison de baromètres situés à des endroits différents

La comparaison de baromètres est essentielle. Elle devrait être effectuée de la façon suivante :

- a) Pour comparer un baromètre 1 à un baromètre 2, il faut qu'un observateur qualifié transporte au moins trois étalons voyageurs, du type P de préférence, de la position du baromètre 1 jusqu'à la position du baromètre 2 puis revienne à la position du baromètre 1, faisant ainsi un circuit complet. Cette procédure est applicable aussi bien entre pays qu'à l'intérieur d'un même pays. Le baromètre 1 se trouve généralement au laboratoire central d'une organisation nationale de normalisation ou au laboratoire d'un Service météorologique national. Le baromètre 2 peut se trouver à des endroits divers. Le transport d'instruments des catégories N et M n'est pas obligatoire et ceux de la catégorie M peuvent être inutiles si des microbarographes de bonne qualité sont disponibles aux deux endroits.
- b) Pour les besoins de l'étalonnage, les étalons voyageurs devraient être placés près du baromètre à comparer de manière que l'exposition de tous les instruments soit la même pendant au moins 24 h avant que les premières lectures comparatives ne soient effectuées. L'égalisation des températures sera facilitée en dirigeant sur les instruments un courant d'air produit par un ventilateur électrique. La température de la pièce devrait être maintenue aussi uniforme que possible.

- Note : Il convient d'arrêter le ventilateur avant de commencer les comparaisons.
- c) Les lectures comparatives ne devraient pas être faites si le microbarographe M indique une variation rapide de la pression. Il faut choisir de préférence des périodes où le champ barométrique est stable, autrement dit des périodes au cours desquelles la pression ne varie pas ou ne varie que très lentement.
- d) Les lectures comparatives devraient être faites à intervalles réguliers, de 15 min au moins.
- e) L'expérience montre qu'il est nécessaire de procéder à cinq lectures comparatives au moins pour étalonner les baromètres de la catégorie S des stations ordinaires et que ce nombre s'élève à dix au moins pour les baromètres des catégories A, B et C.
- f) Dans ces derniers cas, les lectures comparatives devraient être faites, si les conditions météorologiques le permettent, sur toute une gamme de valeurs allant des pressions faibles aux pressions élevées.
- g) Les indications relevées lors de chaque comparaison devraient comprendre les températures observées sur les thermomètres associés aux baromètres; les pressions lues sur les étalons voyageurs et sur les baromètres faisant l'objet des comparaisons ; la vitesse et la direction du vent, les rafales ; les corrections de pesanteur, de température et de l'erreur instrumentale ; l'altitude exacte du point zéro des baromètres au-dessus du niveau de la mer ; la latitude ; la longitude ; le nom du lieu ; la date et l'heure de chaque observation.
- h) En cas d'emploi d'instruments de la catégorie N, les lectures devraient être faites au moins sur deux baromètres anéroïdes de précision, corrigées sur une base commune, si ces instruments n'ont pas le même étalonnage par rapport à un baromètre de la catégorie A ou B. Les lectures corrigées des baromètres anéroïdes doivent être concordantes dans les limites d'exactitude tolérées, sinon la comparaison ne pourra pas être considérée comme valable.
- i) En ce qui concerne les comparaisons au moyen d'étalons voyageurs, le baromètre 1 devrait être de la catégorie la plus élevée des étalons disponibles au point de départ. Cette catégorie devrait, de préférence, être A, B ou Br et, d'une manière générale, elle ne devrait jamais être inférieure à C (voir section 3.10.5.1). Les comparaisons des étalons voyageurs et du baromètre 1 doivent être faites à deux reprises, c'est-à-dire :
 - Avant que les étalons voyageurs soient transportés du lieu où se trouve le baromètre 1 au lieu où se trouve le baromètre 2 ;
 - Au retour des étalons voyageurs depuis le

- lieu où se trouve le baromètre 2. Les résultats des deux comparaisons, avant le départ et après le retour, doivent être ensuite vérifiés. Si ces résultats concordent avec les indications du baromètre 1, dans les limites d'exactitude tolérées pour chaque instrument utilisé, on admettra que l'exactitude des comparaisons des étalons voyageurs et du baromètre 2 est identique, à condition que les comparaisons aient été faites en prenant les précautions d'usage. Mais, si l'on constate une divergence notable ou si l'on sait qu'à la suite d'un incident les instruments ont pu être endommagés, ou encore si les données sont douteuses pour quelque raison que ce soit, la comparaison est estimée non valable et le processus doit être répété.
- j) Dans la mesure du possible, toutes les divergences devraient finalement être exprimées par rapport aux lectures faites sur un baromètre primaire ou secondaire de la catégorie A. On obtiendra ainsi une base commune pour toutes les comparaisons. Chaque compte rendu de comparaison devrait mentionner le type d'étalon utilisé.
- Note : Lorsque le programme choisi prévoit l'élimination des erreurs résiduelles, on utilisera un système homogène de données d'observation barométrique basées sur un étalon unique, de manière à éliminer les erreurs dues aux instruments dans la détermination des gradients horizontaux de la pression.
- k) Chaque fois que l'on nettoie le mercure d'un baromètre ou que l'on déplace un baromètre dans un laboratoire ou une station, il est nécessaire de faire des comparaisons avec d'autres baromètres avant et après l'opération, de manière à déceler immédiatement toute anomalie éventuelle.

3.10.5 Comparaison de baromètres régionaux

3.10.5.1 Nomenclature et symboles

Les symboles suivants désignent les différentes catégories de baromètres :

- A_r : Baromètre de la catégorie A choisi, par accord régional, comme baromètre étalon de référence pour la région.
- B_r : Baromètre de la catégorie B accepté comme baromètre étalon par les Services météorologiques nationaux de la région lorsqu'aucun baromètre de la catégorie A n'est disponible.

L'annexe 3.B contient une liste des baromètres étalons régionaux.

3.10.5.2 Comparaisons interrégionales

Les mesures suivantes doivent être prises lors de la planification des comparaisons interrégionales :

- a) Les pays Membres de chaque région doivent choisir un baromètre étalon primaire ou secondaire de la catégorie A qui servira d'étalon A_r dans leur région. Si aucun baromètre étalon primaire ou secondaire n'est disponible dans la région, ils choisiront un baromètre de la catégorie B qui sera le baromètre étalon de leur région, désigné par le symbole B_r . Si cela leur paraît plus avantageux financièrement, ils peuvent adopter plusieurs baromètres étalons régionaux.
- b) Une personne compétente transportera des étalons voyageurs depuis un centre disposant d'un baromètre de la catégorie A_r jusqu'à une région voisine disposant au moins d'un baromètre de la catégorie B ou B_r . Elle procédera à la comparaison des baromètres conformément à la méthode exposée à la section 3.10.3. Il est parfois souhaitable de procéder à des vérifications et comparaisons supplémentaires et de renouveler le processus en comparant le baromètre B_r avec un baromètre de la catégorie A_r d'une autre région.
- c) Les relevés obtenus au cours de la comparaison devront être transmis à chaque centre disposant d'un baromètre A ainsi qu'à la (aux) station(s) où se trouve(nt) le(s) baromètre(s) B ou B_r ayant fait l'objet des comparaisons. Des résumés des résultats des comparaisons faites de cette manière doivent être adressés à tous les Services météorologiques nationaux de la région où se trouve(nt) le(s) baromètre(s) B ou B_r .

3.10.5.3 Comparaisons internationales au sein d'une région

Les mesures suivantes doivent être prises lors de la planification des comparaisons internationales :

- a) Chaque Service météorologique national doit comparer son (ses) baromètre(s) de la catégorie B à un baromètre de la catégorie A à l'intérieur de la région, s'il en existe un, en procédant de la manière indiquée à la section 3.10.4. Lorsque cela est possible, l'instrument choisi comme étalon pour le territoire devrait de préférence être le baromètre A de la région.
- b) Lorsqu'aucun baromètre de la catégorie A n'est disponible dans la région, les baromètres de la catégorie B des différents Services météorologiques nationaux de la région devront être comparés au(x) baromètre(s) B_r de la région, en procédant comme indiqué à la section 3.10.4.
- c) Lorsqu'une personne compétente se déplace pour exécuter le programme de comparaison

entre les baromètres B et B_r, il est souhaitable qu'elle fasse des comparaisons supplémentaires avec des baromètres des catégories B et C situés sur le trajet entre son point de départ et la (les) station(s) où se trouve(nt) le(s) baromètre(s) B_r de la région, et ce aussi bien à l'aller qu'au retour.

- d) Les relevés et comptes rendus résumés des comparaisons devront être communiqués aux organismes intéressés suivant la procédure indiquée au paragraphe 3.10.5.2c).

3.11 RÉDUCTION DE LA PRESSION MESURÉE À DES NIVEAUX DIFFÉRENTS

Il est nécessaire de réduire au même niveau les observations barométriques faites à des stations situées à des altitudes différentes, afin de pouvoir les comparer. Plusieurs méthodes sont appliquées pour procéder à cette réduction, mais l'OMM n'a pas encore recommandé une méthode particulière, sauf dans le cas des stations situées à faible altitude.

La méthode recommandée est décrite dans diverses notes techniques de l'OMM (1954; 1964; 1968). Les Tables météorologiques internationales (OMM, 1966) contiennent un ensemble détaillé de formules pouvant servir au calcul de la pression.

3.11.1 Niveaux standard

La pression atmosphérique observée devrait être réduite au niveau moyen de la mer pour toutes les stations où cela peut se faire avec une exactitude suffisante (voir chapitre 1, Partie I). Lorsque cela se révèle impossible, la station devrait indiquer, en vertu d'un accord régional, soit le géopotentiel d'un «niveau de pression constante» convenu, soit la pression réduite à un niveau de référence convenu pour cette station. Le niveau choisi pour chaque station devrait être communiqué au Secrétariat de l'OMM en vue de sa notification officielle.

Formule de réduction de la pression au niveau de la mer possible pour les stations situées à moins de 750 m d'altitude (note technique N° 61 de l'OMM, p. 22, éq. 2) :

$$\log_{10} \frac{p_0}{p_s} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_{mv}} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h} \quad (3.1)$$

où :

p_0 = pression réduite au niveau de la mer, en hPa
 p_s = pression à la station, en hPa

K_p	= constante = 0,0148275 K / gpm
H_p	= altitude de la station, en gpm
T_{mv}	= température virtuelle moyenne, en K
T_s	= température à la station, en K
T_s	= 273,15 + t, t = température à la station, en °C
a	= gradient vertical supposé dans la colonne d'air fictive s'étendant du niveau de la mer à l'altitude de la station = 0,0065 K / gpm
e_s	= tension de vapeur à la station, en hPa
C_h	= coefficient = 0,12 K / hPa

La même formule s'emploie souvent dans sa forme exponentielle :

$$p_0 = p_s \cdot \exp\left(\frac{\frac{g_n}{R} \cdot H_p}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h}\right) \quad (3.2)$$

où :

g_n	= accélération normale de la pesanteur = 9,80665 m / s ²
R	= constante des gaz pour l'air sec = 287,05 J / kg / K

3.11.2 Stations situées à faible altitude

Aux stations situées à faible altitude (soit à moins de 50 m au-dessus du niveau moyen de la mer), on devrait réduire la pression au niveau moyen de la mer en ajoutant à la pression de la station un terme constant de réduction C , donné par l'expression ci-dessous :

$$C = p \cdot H_p / 29,27 T_v \quad (3.3)$$

où p = pression observée à la station (hPa), H_p = altitude de la station en mètres et T_v = valeur normale annuelle moyenne de la température virtuelle à la station (K).

• Note : La température virtuelle de l'air humide est la température à laquelle l'air sec soumis à la même pression aurait la même densité que l'air humide. Les Tables météorologiques internationales (OMM, 1966) donnent les accroissements de la température virtuelle de l'air saturé pour diverses pressions et températures.

Cette méthode ne devrait être employée que pour les stations d'une altitude si basse que, si les valeurs extrêmes absolues de la température virtuelle étaient substituées à T_v dans l'équation, l'écart entre les résultats ainsi obtenus dû aux autres approximations de l'équation (utilisation de la hauteur au lieu du géopotentiel standard et attribution d'une petite valeur à C par rapport à celle de P) serait négligeable.

3.12

**TENDANCE DE LA PRESSION ET
CARACTÉRISTIQUE DE LA TENDANCE
DE LA PRESSION**

Dans les stations d'observation synoptique en surface, la tendance de la pression et sa caractéristique devraient être établies à partir des observations de la pression effectuées au cours des trois dernières heures (au cours d'une période de 24 h dans les régions tropicales). En règle générale, la caractéristique de la tendance de la pression peut être décrite par le profil de la courbe enregistrée par un barographe durant les trois heures précédant une observation (OMM, 2003). Si les obser-

vations ont lieu toutes les heures, la détermination de l'ampleur et de la caractéristique ne peut se fonder que sur quatre observations, ce qui est susceptible d'entraîner des erreurs d'interprétation. Il est donc recommandé de déterminer la caractéristique en se fondant sur des observations plus rapprochées, effectuées par exemple à intervalle de 10 min (OMM, 1985). Neuf types de caractéristiques de la tendance de la pression sont définis (voir OMM, 1992b, p. II-4-8).

ANNEXE 3.A

CORRECTION DES LECTURES DU BAROMÈTRE AUX CONDITIONS NORMALES

Corrections de l'erreur instrumentale

Les erreurs résiduelles dans la graduation de l'échelle d'un baromètre devraient être déterminées par comparaison avec un baromètre étalon. Elles peuvent inclure des erreurs dues à une fixation ou division inexacte de l'échelle, à la capillarité et à un vide imparfait. Les certificats de comparaison avec l'étalon devraient mentionner les corrections à appliquer pour l'erreur instrumentale en quatre points de l'échelle au moins, par exemple tous les 50 hPa. Pour un bon baromètre, ces corrections ne devraient pas excéder quelques dixièmes d'hectopascal.

Corrections de pesanteur

La lecture d'un baromètre à mercure à une pression et à une température données dépend de l'accélération de la pesanteur qui, à son tour, varie avec la latitude et l'altitude. Les baromètres qui servent aux applications météorologiques sont étalonnés de manière à donner des lectures barométriques vraies à l'accélération normale de la pesanteur ($9,806\ 65\ m\ s^{-2}$) et les valeurs lues sur l'échelle du baromètre pour toute autre valeur de la pesanteur doivent être corrigées. Pour réduire ces lectures à la valeur normale de l'accélération de la pesanteur, il est recommandé d'appliquer la méthode suivante: soit B = valeur de la pression lue sur l'échelle du baromètre à mercure, B_t = valeur de la pression réduite à la température normale et corrigée des erreurs instrumentales, mais non réduite à l'accélération normale de la pesanteur, B_n = valeur de la pression réduite à l'accélération normale de la pesanteur et à la température normale, et corrigée des erreurs instrumentales, B_{ca} = moyenne climatologique de B_t à la station, $g_{\varphi H}$ = valeur locale de l'accélération de la pesanteur (en $m\ s^{-2}$) à une station située à la latitude φ et à l'altitude H au-dessus du niveau de la mer et g_n = accélération normale de la pesanteur, soit $9,806\ 65\ m\ s^{-2}$,

les relations suivantes sont admises:

$$B_n = B_t (g_{\varphi H}/g_n) \quad (3.A.1)$$

ou

$$B_n = B_t + B_t [(g_{\varphi H}/g_n) - 1] \quad (3.A.2)$$

On peut utiliser l'approximation 3.A.3 ci-dessous, à condition que le résultat auquel elle conduit ne dif-

fère pas plus de 0,1 hPa de celui qui serait obtenu au moyen de l'équation 3.A.2 :

$$B_n = B_t + B_{ca} [(g_{\varphi H}/g_n) - 1] \quad (3.A.3)$$

L'accélération locale de la pesanteur $g_{\varphi H}$ devrait être déterminée par l'une des méthodes exposées dans la section qui suit. Les valeurs ainsi obtenues devraient être signalées comme appartenant au réseau international de normalisation gravimétrique 1971 (IGSN71).

Détermination de l'accélération locale de la pesanteur

Deux techniques peuvent être utilisées pour déterminer, avec un degré d'exactitude satisfaisant, la valeur locale de l'accélération de la pesanteur à une station. Ces techniques nécessitent, dans le premier cas, l'utilisation d'un gravimètre (instrument permettant de mesurer la différence entre la valeur de l'accélération de la pesanteur à deux points) et, dans le second cas, l'emploi de ce que l'on appelle l'anomalie de Bouguer. Il convient d'utiliser de préférence la méthode du gravimètre. Si aucune des deux méthodes ne peut être suivie, l'accélération locale de la pesanteur peut être calculée au moyen d'un modèle simple de la Terre.

Utilisation du gravimètre

Soit g_1 l'accélération locale de la pesanteur connue en un point O , normalement une station de base établie par une organisation géodésique, où g_1 est exprimé selon l'IGSN71; supposons que, dans le système météorologique d'accélération de la pesanteur, g représente l'accélération locale de la pesanteur, inconnue en un autre point X pour lequel on désire connaître la valeur g . Soit Δg la différence de l'accélération de la pesanteur entre les deux points, telle qu'on l'observe au moyen du gravimètre, c'est-à-dire que Δg est la valeur au point X moins la valeur au point O dans un système homogène. Dans ce cas, g est donné par l'équation 3.A.4 :

$$g = g_1 + \Delta g \quad (3.A.4)$$

Utilisation de l'anomalie de Bouguer

Si l'on ne dispose pas d'un gravimètre, on peut utiliser l'anomalie de Bouguer (A_B) pour calculer la va-

leur g en un point donné. Il faut pour cela pouvoir se procurer une carte d'isohypses de l'anomalie auprès d'une organisation géodésique ou par l'intermédiaire d'un réseau de stations gravimétriques implanté au voisinage du point et ayant une densité d'au moins une station par $10\ 000\ km^2$ ($100\ km$ de distance au plus entre deux stations).

Il est possible de prendre pour base les données d'un réseau un peu moins dense si l'organisation géodésique considère qu'on obtiendra ainsi des résultats plus sûrs qu'en employant un gravimètre.

La définition de l'anomalie de Bouguer (A_B) s'obtient à partir de l'équation 3.A.5:

$$g_s = (g_{\varphi,0})s - C \cdot H + A_B \quad (3.A.5)$$

où $(g_{\varphi,0})s$ est la valeur théorique de l'accélération de la pesanteur à la latitude φ au niveau de la mer, telle qu'elle est donnée par la formule réellement utilisée pour calculer l'anomalie de Bouguer. Cette formule exprime la valeur comme une fonction de la latitude dans certains systèmes; H = altitude de la station (en mètres au-dessus du niveau de la mer) à laquelle g_s est mesuré; g_s = valeur observée de l'accélération de la pesanteur (en $m\ s^{-2}$); A_B = anomalie de Bouguer (en $m\ s^{-2}$); C = facteur de correction d'altitude utilisé pour le calcul de l'anomalie de Bouguer (si on utilise, par exemple, une densité crustale de 2,67, ce facteur est de 0,000 001 968 $m\ s^{-2}$).

Quand on désire connaître la valeur de g dans une station donnée alors qu'elle n'y a pas été mesurée, il convient de la calculer au moyen de l'équation 3.A.5, à condition de pouvoir interpoler la valeur appropriée de A_B à l'emplacement de la station en se servant soit des cartes d'isohypses mentionnées ci-dessus, soit des données représentant l'anomalie de Bouguer fournie par un réseau adéquat de stations gravimétriques.

Calcul de l'accélération locale de la pesanteur

Si aucune des méthodes décrites précédemment ne peut être appliquée, il est possible de calculer la valeur locale, avec moins d'exactitude, en fonction d'un modèle simple. Selon le Système géodésique de référence 1980, la valeur théorique ($g_{\varphi,0}$) de l'accélération de la pesanteur au niveau moyen de la mer, à la latitude géographique φ , se calcule au moyen de l'équation 3.A.6:

$$g_{\varphi,0} = 9,80620 (1 - 0,0026442 \cos 2\varphi + 0,000 005 8 \cos^2 2\varphi) \quad (3.A.6)$$

La valeur locale de l'accélération de la pesanteur en un point donné à la surface du sol pour une station terrestre se calcule au moyen de l'équation 3.A.7:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000 003 086 H + 0,000 001 118 (H - H') \quad (3.A.7)$$

où g = valeur locale calculée de l'accélération de la pesanteur, en $m\ s^{-2}$, au point donné; $g_{\varphi,0}$ = valeur théorique de l'accélération de la pesanteur, en $m\ s^{-2}$, au niveau moyen de la mer à la latitude géographique φ , calculée conformément à l'équation 3.A.6 ci-dessus; H = altitude réelle du point donné, en mètres, au-dessus du niveau moyen de la mer; H' = valeur absolue, en mètres, de la différence entre l'altitude du point donné et l'altitude moyenne de la surface réelle du terrain comprise à l'intérieur d'un cercle d'environ 150 km de rayon, centré sur le point donné.

La valeur locale de l'accélération de la pesanteur en un point donné, à la distance H du niveau moyen de la mer ne dépassant pas 10 km environ, là où le point en question se trouve au-dessus de la surface de l'eau de la mer, se calcule au moyen de l'équation 3.A.8:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000 003 086 H - 0,000 006 88 (D - D') \quad (3.A.8)$$

où D = profondeur de l'eau, en mètres, au-dessous du point donné et D' = profondeur moyenne de l'eau, en mètres, à l'intérieur d'un cercle d'environ 150 km de rayon, centré sur le point donné.

Dans les stations ou aux points situés sur ou près d'une côte, la valeur locale de l'accélération de la pesanteur devrait être calculée, autant que possible, au moyen des équations 3.A.7 et 3.A.8 sur une base proportionnelle, en donnant au dernier terme de l'équation 3.A.7 une pondération en accord avec la proportion de la surface terrestre incluse dans le cercle spécifié et en donnant au dernier terme de l'équation 3.A.6 une pondération en accord avec la proportion de la surface maritime incluse à l'intérieur du cercle. Les valeurs ainsi déterminées sont alors combinées algébriquement pour obtenir la correction à appliquer aux deux derniers termes dans le membre de droite de chacune de ces équations, comme le montre l'équation 3.A.9 ci-dessous :

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000 003 086 H + 0,000 001 118 \alpha (H - H') - 0,000 006 88 (1 - \alpha) (D - D') \quad (3.A.9)$$

où α est la fraction de la région visée qui est couverte de terre et H' et D' sont respectivement les zones terrestres et aquatiques réelles.

Corrections de température

Les résultats des lectures du baromètre doivent être réduits aux valeurs que l'on aurait obtenues si le mer-

cure et l'échelle avaient été soumis à leur température normale, qui est de 0 °C pour les baromètres à mercure. Suivant les baromètres, l'échelle utilisée peut fournir la pression exacte à 0 °C, ou encore à 20 °C.

La correction de température à appliquer aux baromètres à cuvette réglable (baromètres du type Fortin) diffère de celle que nécessitent les baromètres à cuvette fixe. Toutefois, la raison pour laquelle il y a lieu d'appliquer cette correction est la même dans les deux cas, à savoir la différence entre le coefficient de dilatation cubique du mercure et le coefficient de dilatation linéaire de l'échelle. Il faut donc apporter une certaine correction pour les deux types de baromètres à mercure.

Le baromètre à cuvette fixe nécessite une correction supplémentaire. En effet, une augmentation de la température de l'instrument entraîne l'augmentation tant du volume du mercure que de la section de

la cuvette (de fer) et du tube (de verre). Compte tenu de ces variations de sections, la montée apparente du mercure dans le tube découlant de l'augmentation de la température est inférieure à ce qu'elle serait si les sections en question demeuraient constantes, puisqu'une partie du mercure occupe la capacité accrue produite par la dilatation de la cuvette et du tube.

L'échelle du baromètre à cuvette fixe doit, pour diverses raisons, être étalonnée par comparaison avec un baromètre étalon primaire à cuvette réglable. Certains fabricants réduisent le volume de mercure de telle façon que les lectures du baromètre correspondent aux valeurs fournies par le baromètre étalon à 20 °C. Il est possible de dresser des tables de correction pour les baromètres à cuvette fixe à partir des valeurs fournies par le baromètre étalon primaire dont l'échelle est juste à la température de référence de 20 °C.

Corrections de température pour les baromètres à mercure

Les corrections de température à appliquer aux baromètres à mercure ont fait l'objet de travaux de recherche approfondis, dont les résultats sont résumés ci-après :

- | | |
|--|--|
| 1. a) Échelle juste à 0 °C et, en outre
b) Volume de Hg juste à 0 °C | $C_t = -B(\alpha - \beta) \cdot t$
$C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot 4V/3A$ |
| 2. Échelle juste à 0 °C et
Volume de Hg juste à 20 °C | $C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot 4V/3A$ |
| 3. a) Échelle juste à 20 °C
b) Volume de Hg juste à 0 °C
c) Diminution du volume de Hg
équivalant à 0,36 hPa | $C_t = -B[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)]$
$C_{t,V} = -B \cdot t - \beta \cdot (t - 20) - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$
$C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$ |
| 4. Échelle juste à 20 °C et
a) Volume de Hg juste à 20 °C
b) Diminution du volume de Hg
équivalant à 0,36 hPa | $C_{t,V} = -B \cdot t - \beta(t - 20) - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$
$C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$ |

où :

- C_t = correction de température;
- $C_{t,V}$ = correction supplémentaire appliquée au baromètre à cuvette fixe;
- B = valeur indiquée par le baromètre;
- V = volume total du mercure dans le baromètre à cuvette fixe;
- A = superficie effective de la cuvette;
- t = température;
- α = coefficient de dilatation cubique du mercure;
- β = coefficient de dilatation linéaire de l'échelle;
- η = coefficient de dilatation linéaire de la cuvette.

ANNEXE 3.B

BAROMÈTRES ÉTALONS RÉGIONAUX

<i>Région</i>	<i>Emplacement</i>	<i>Catégorie^a</i>
I	Le Caire, Égypte Casablanca, Maroc Dakar, Sénégal Douala, Cameroun Kinshasa/Binza, République démocratique du Congo Nairobi, Kenya Oran, Algérie	A _r A _r A _r A _r A _r A _r A _r
II	Calcutta, Inde	B _r
III	Buenos Aires, Argentine Maracay, Venezuela Rio de Janeiro, Brésil	B _r B _r A _r
IV	Miami, Floride, États-Unis (sous-régional) San Juan, Puerto Rico (sous-régional) Toronto, Canada (sous-régional) Washington D.C. (Gaithersburg, Maryland), États-Unis	A _r A _r A _r A _r
V	Melbourne, Australie	A _r
VI	Londres, Royaume-Uni Saint-Pétersbourg, Fédération de Russie Trappes, France Hambourg, Allemagne	A _r A _r A _r A _r

^a La définition des catégories est donnée dans la section 3.10.5.1.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Liu, H. et G. Darkow, 1989 : Wind effect on measured atmospheric pressure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 6, n° 1, p. 5-12.
- Miksad, R., 1976 : An omni-directional static pressure probe. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 15, p. 1215-1225.
- Organisation météorologique mondiale, 1954 : *Reduction of Atmospheric Pressure: Preliminary Report on Problems Involved*. Note technique N° 7 de l'OMM, OMM-N° 36. T.P. 12, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1964 : *Note on the Standardization of Pressure Reduction Methods in the International Network of Synoptic Stations*. Note technique N° 61 de l'OMM, OMM-N° 154. T.P. 74, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1966 : *Tables météorologiques internationales* (sous la direction de S. Letestu). OMM-N° 188, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1968 : *Methods in Use for the Reduction of Atmospheric Pressure*. Note technique N° 91 de l'OMM, OMM-N° 226. T.P. 120, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1985 : Pressure tendency and discontinuity in wind (L. Bergman, T. Hovberg et H. Wibeck). *Articles présentés à la Troisième conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECIMO-III)*, Rapport N° 22 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, WMO/TD-No. 50, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990 : *Guide des systèmes d'observation et de diffusion de l'information pour l'assistance météorologique à la navigation aérienne*. OMM-N° 731, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992a : *The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison* (J.P. van der Meulen). Rapport N° 46 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, WMO/TD-No. 474, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992b : *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision*. OMM-N° 485, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel du Système mondial d'observation*. OMM-N° 544, Genève.
- Sax, N.I. 1975 : *Dangerous Properties of Industrial Materials*. Quatrième édition, Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- United States Weather Bureau, 1963 : *Manual of Barometry* (WBAN). Vol. 1, première édition, US Government Printing Office, Washington D.C.

CHAPITRE 4

MESURE DE L'HUMIDITÉ

4.1 GÉNÉRALITÉS

Dans la plupart des domaines d'activités de la météorologie, l'humidité atmosphérique représente un paramètre essentiel qu'il importe de mesurer et souvent aussi d'enregistrer en continu. Le présent chapitre traite du mesurage de l'humidité à la surface terrestre ou non loin de celle-ci. Nombreuses sont les méthodes utilisées et vaste est la documentation. L'ouvrage publié sous la direction de Wexler (1965), bien que datant quelque peu, offre un tour d'horizon encore utile des techniques de mesure adaptées à ce paramètre.

4.1.1 Définitions

Les définitions des termes utilisés dans le présent chapitre sont celles que donne le *Règlement technique* de l'OMM (OMM-N° 49) dans son annexe B, dont le texte est reproduit dans l'annexe 4.A figurant en fin de chapitre.

Voici les définitions simples des grandeurs les plus usuelles dans la mesure de l'humidité :

- *Le rapport de mélange r* est le rapport entre la masse de la vapeur d'eau et la masse de l'air sec ;
- *L'humidité spécifique q* est le rapport entre la masse de la vapeur d'eau et la masse de l'air humide ;
- *La température du point de rosée T_d* est la température à laquelle l'air humide, saturé par rapport à l'eau à la pression donnée, a un rapport de mélange de saturation égal au rapport de mélange donné ;
- *L'humidité relative U* est le rapport en pourcentage de la tension de vapeur observée à la tension de vapeur saturante par rapport à l'eau, à la même pression et à la même température ;
- *La tension de vapeur e'* est la pression partielle exercée par la vapeur d'eau contenue dans l'air ;
- *Les tensions de vapeur saturantes e'_w et e'_i* sont les tensions exercées par la vapeur contenue dans l'air, en équilibre avec, respectivement, une surface d'eau et une surface de glace.

L'annexe 4.B présente les formules et coefficients permettant de calculer les diverses quantités qui donnent une indication de l'humidité de l'air. Ces formules et coefficients ont été adoptés par l'OMM en 1990¹. Ils sont utiles et d'une exactitude suffisante pour toutes les applications météorologiques courantes (OMM/TD-N° 289).

Sonntag (1990 ; 1994) présente des formules à la fois plus exactes et plus détaillées ainsi que le calcul d'autres quantités. D'autres formules détaillées² sont présentées dans les publications de l'OMM N° 188 (1966, introductions aux tableaux 4.8 à 10) et N° 49 (1988, appendice A)³.

4.1.2 Unités et échelles

Les unités et symboles qui suivent servent normalement à exprimer les quantités les plus souvent utilisées relativement à la vapeur d'eau dans l'atmosphère :

- a) Le rapport de mélange r et l'humidité spécifique q en kg kg^{-1} ;
- b) Les tensions de vapeur dans l'air e' , e'_w et e'_i ainsi que la pression p en hPa ;
- c) La température T , la température du thermomètre mouillé T_w , la température du point de rosée T_d et la température du point de gelée blanche T_f en K ;
- d) La température t , la température du thermomètre mouillé T_w , la température du point de rosée t_d , et la température du point de gelée blanche t_f en $^{\circ}\text{C}$;
- e) L'humidité relative U en %.

4.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

D'une façon générale, les mesures de l'humidité à la surface du globe servent à l'analyse et à la prévision en météorologie, aux études climatologiques ainsi qu'à de nombreuses autres applications spéciales dans les domaines de l'hydrologie, de l'agriculture, de l'aéronautique et de l'environnement. Leur lien avec les changements d'état de l'eau dans l'atmosphère les rend particulièrement importantes.

Le chapitre 1 de la Partie I et le tableau 4.1 donnent les critères généraux qui s'appliquent à l'étendue de mesure, à la résolution et à l'exactitude en ce qui concerne les mesures de l'humidité. Les valeurs fournies se rapportent à des instruments de qualité, en bon état de fonctionnement et utilisés comme il convient. Il n'est pas facile d'atteindre un tel degré d'exactitude dans la pratique. On peut citer le cas du psychromètre sous abri météorologique sans ventilation forcée, soit une configuration encore très répandue, dont les performances sont loin d'atteindre les valeurs indiquées dans le tableau 4.1.

² Résolution 19 (Cg-IV) du Quatrième Congrès météorologique mondial.

³ Le rectificatif apporté en 2000 à la publication OMM (1988) contient une coquille ; la formule exacte figure dans OMM (1966).

¹ Résolution 6 (EC-XLII) du Conseil exécutif à sa quarante-deuxième session.

Tableau 4.1.
Récapitulatif des critères de performance
s'appliquant à la mesure de l'humidité en surface

Critères	Température du thermomètre mouillé	Humidité relative (U)	Température du point de rosée
Étendue de mesure	de -10 à 35 °C	de 5 à 100 %	Au moins 50 K entre -60 et 35 °C
Incertitude cible ^a	0,1 K, U élevée 0,2 K, U moyenne	1 %, U élevée 5 %, U moyenne	0,1 K, U élevée 0,5 K, U moyenne
Incertitude réalisable ^b	0,2 K	de 3 à 5 % ^c	0,5 K ^c
Résolution possible indiquée par les codes	0,1 K	1 %	0,1 K
Constante de temps du capteur ^d	20 s	40 s	20 s
Intervalle de temps pour le calcul de la moyenne ^e	60 s	60 s	60 s

- a - Deux écarts-types sont fournis pour l'incertitude cible.
- b - À échelle moyenne, l'humidité relative pour un instrument bien conçu et bien utilisé ; difficile à réaliser en pratique.
- c - Si la mesure est effectuée directement.
- d - Pour les besoins de la climatologie, la constante doit être de 60 s (pour 63 % d'un palier).
- e - Pour les besoins de la climatologie, la moyenne doit être établie sur 3 minutes.

Une constante de temps de l'ordre de la minute convient pour la plupart des applications. Les temps de réponse des différents instruments utilisés en exploitation sont indiqués à la section 4.1.4.9.

4.1.4 Méthodes de mesure

Sonntag (1994) fait le point des connaissances actuelles dans le domaine de l'hygrométrie.

4.1.4.1 Hygromètres

Hygromètre est le terme générique désignant tout instrument de mesure de l'humidité de l'air. Les principes physiques les plus souvent appliqués en hygrométrie sont indiqués ci-dessous (sections 4.1.4.4 à 4.1.4.8). On trouvera plus de détails dans Wexler (1965). L'ouvrage de Skaar et al. (OMM/TD-N° 316) contient le compte rendu d'une comparaison internationale de divers types d'hygromètres, organisée par l'OMM.

4.1.4.2 Conditions générales d'exposition

Les conditions générales d'exposition des capteurs d'humidité sont analogues à celles des capteurs de température. Il est donc possible de placer ces capteurs dans un abri météorologique installé correctement. Il convient en particulier :

- a) De protéger l'instrument contre le rayonnement solaire direct, les contaminants atmosphériques, la pluie et le vent ;

- b) D'éviter la formation d'un microclimat dans l'enveloppe du capteur ou dans le dispositif d'échantillonnage. Il y a lieu de noter que le bois et beaucoup de matériaux synthétiques absorbent ou perdent de la vapeur d'eau en fonction de l'humidité de l'atmosphère.

L'exposition convenant à chaque instrument est décrite ci-après (sections 4.2 à 4.7).

4.1.4.3 Causes générales d'erreur

Voici les erreurs ou causes d'erreur qui s'appliquent à la mesure de l'humidité :

- a) La modification de l'échantillon d'air, par une source ou un puits de chaleur ou de vapeur d'eau, etc. ;
- b) La contamination du capteur, par de la poussière, des embruns, etc. ;
- c) Les erreurs d'étalonnage, y compris correction de pression, coefficient de température du capteur et interface électrique ;
- d) La confusion entre les phases liquide et solide (eau et glace) ;
- e) Les défauts de conception de l'instrument, conduction de la chaleur par la tige du thermomètre mouillé, etc. ;
- f) Les défauts de fonctionnement, impossibilité d'atteindre un équilibre stable, etc. ;
- g) Des intervalles d'échantillonnage ou d'établissement de la moyenne, voire les deux, incorrects.

Il devrait y avoir cohérence entre la constante de temps du capteur, l'intervalle de temps pour le calcul de la moyenne et les exigences touchant les données.

Les causes d'erreur qui précèdent s'appliquent différemment aux divers capteurs d'humidité. De plus amples détails figurent donc dans les sections pertinentes qui suivent.

4.1.4.4 Hygrométrie gravimétrique

Cette méthode repose sur l'absorption par un agent déshydratant de la vapeur d'eau contenue dans un volume d'air connu. (L'hygromètre gravimétrique n'est employé que pour les étalons primaires.) La section 4.9 fournit quelques détails à ce sujet.

La méthode gravimétrique offre une mesure absolue de la teneur en vapeur d'eau d'un échantillon d'air dont elle fournit le rapport de mélange. Il s'agit tout d'abord d'extraire la vapeur d'eau contenue dans l'échantillon à l'aide d'un agent déshydratant. Le déshydratant est pesé avant, puis après l'opération et la différence permet d'établir la masse de la vapeur d'eau. On détermine la masse de l'échantillon sec soit en pesant celui-ci soit en mesurant son volume.

Cette méthode est uniquement employée pour fournir un étalon absolu servant de référence, appareil que l'on trouve principalement dans les laboratoires d'étalonnage nationaux.

4.1.4.5 Méthodes reposant sur la condensation

4.1.4.5.1 *Méthode du miroir refroidi (hygromètre à point de rosée ou à point de gelée)*

Lorsque de l'air humide à la température T , à la pression p et ayant un rapport de mélange r_w (ou r_i) est refroidi, il finit par atteindre son point de saturation par rapport à l'eau (ou à la glace, à des températures relativement basses) ; il peut alors se former de la rosée (ou de la gelée blanche) sur une surface solide non hygroscopique. La température correspondant à ce point de saturation est la température du point de rosée T_d (ou du point de gelée T_f).

L'hygromètre à miroir (refroidi) sert à mesurer T_d ou T_f . Les systèmes les plus courants sont équipés d'une petite surface réfléchissante de métal poli, refroidie par dispositif électrique à effet Peltier, et d'un élément optique servant à détecter la condensation.

Des instruments fonctionnant selon cette méthode sont employés pour les besoins de l'observation, mais peuvent servir aussi d'étalons de travail ou d'étalons de référence (voir section 4.4).

4.1.4.5.2 *Méthode des solutions salines chauffées (cellule à point de rosée)*

La tension de vapeur d'équilibre à la surface d'une solution saline saturée est inférieure à celle présente à une surface semblable d'eau pure à la même température. Cela est vrai pour toutes les solutions salines, mais l'effet est particulièrement évident dans le cas du chlorure de lithium dont la tension de vapeur d'équilibre est exceptionnellement basse.

Il est possible de chauffer une solution aqueuse saline (dont la tension de vapeur d'équilibre est inférieure à la tension de vapeur ambiante) jusqu'à ce que soit atteinte une température à laquelle sa tension de vapeur d'équilibre dépassera la tension de vapeur ambiante. Il n'y a plus alors condensation, mais évaporation, ce qui en fin de compte mène à un changement de phase de la solution aqueuse qui prend une forme (cristalline) hydratée solide. Il est possible de détecter cette transition, puisqu'elle est marquée par une diminution de la conductivité électrique de la solution lorsque celle-ci se cristallise. La tension de vapeur ambiante est déduite de la température de la solution à laquelle cette tension de vapeur ambiante est atteinte. À cet effet, on place un thermomètre dans la solution en prenant soin d'établir un bon contact thermique. Il est possible de dé-

terminer le point de rosée ambiant (c'est-à-dire par rapport à la surface plane d'une eau pure) à l'aide de données empiriques établissant la relation entre la tension de vapeur et la température tant pour l'eau pure que pour des solutions salines. Le chlorure de lithium est la solution saline la plus utilisée pour ce type de capteur.

La méthode est employée pour les besoins de l'observation, en particulier dans les stations météorologiques automatiques (voir section 4.5).

4.1.4.6 Méthode psychrométrique

Un psychromètre est essentiellement constitué de deux thermomètres placés côte à côte, l'élément sensible de l'un étant recouvert d'une mince pellicule d'eau ou de glace, d'où son nom de thermomètre mouillé ou thermomètre recouvert de glace. L'élément sensible de l'autre thermomètre, appelé thermomètre sec, est simplement exposé à l'air. Il s'agit de la méthode de mesure la plus répandue, aussi est-elle décrite en détail à la section 4.2.

En raison de l'évaporation de l'eau sur l'élément sensible mouillé, le thermomètre mouillé indique une température généralement inférieure à celle donnée par le thermomètre sec. La différence des deux températures ainsi obtenues est une mesure de l'humidité de l'air ; plus l'humidité ambiante est faible, plus le taux d'évaporation sera élevé et plus grande donc sera la différence dite psychrométrique. La relation entre la différence psychrométrique et l'humidité ambiante est indiquée par la formule psychrométrique.

On emploie beaucoup cette méthode pour les besoins de l'observation. Les instruments servent souvent aussi d'étalons de travail.

4.1.4.7 Méthodes de sorption

Certaines substances interagissent avec la vapeur d'eau et subissent, dans leurs propriétés chimiques ou physiques, un changement suffisamment réversible pour que l'on puisse les utiliser en tant que capteur de l'humidité ambiante. Ces substances peuvent soit adsorber soit absorber la vapeur d'eau, l'adsorption étant la fixation d'une substance à la surface d'une autre, tandis que l'absorption, la pénétration d'une substance dans une autre. De façon caractéristique, un corps est dit hygroscopique lorsqu'il吸吸 la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère environnante, car sa tension de vapeur saturante est inférieure à celle de l'air environnant. Pour que le phénomène d'absorption se produise, il est indispensable que la tension de vapeur de l'atmosphère ambiante soit supérieure à la tension de vapeur saturante du corps en question.

- a) Changements de dimensions des matériaux hygroscopiques : certains matériaux changent de dimensions en fonction de l'humidité. Les fibres naturelles tendent à présenter proportionnellement les plus grandes variations. Il est possible de les utiliser dans un transducteur analogique de déplacement linéaire en les reliant à un mécanisme amplificateur à leviers. Un tel transducteur peut servir à déplacer un indicateur sur une échelle appropriée fournissant un affichage visuel ou il peut être aussi un dispositif électromécanique transformant la variation de distance en grandeur électrique. Pour ce type d'hygromètre, on emploie essentiellement des cheveux. On peut aussi se servir de fibres synthétiques. Compte tenu du temps de réponse très long de ces fibres, il ne faudrait jamais utiliser les hygromètres à fibres synthétiques au-dessous de 10 °C. L'hygromètre à cheveux est décrit à la section 4.3.
- La peau de batteur d'or (membrane organique obtenue à partir de boyaux d'animaux domestiques) dispose de propriétés analogues à celles des cheveux. On l'a aussi utilisée pour mesurer l'humidité, mais surtout dans des appareils de mesure en altitude.
- b) Changements des propriétés électriques des matériaux hygroscopiques : les propriétés électriques de certains matériaux hygroscopiques varient en fonction de l'humidité relative ambiante, sans présenter une grande dépendance thermique. Les méthodes usuelles faisant appel à ce principe sont décrites à la section 4.6.
- On utilise de plus en plus les capteurs électriques d'humidité relative dans les applications exigeant une lecture à distance, en particulier lorsqu'il est nécessaire de disposer d'un affichage direct de l'humidité relative.
- Les propriétés couramment utilisées pour la mesure de l'humidité relative sont la résistance électrique, dans le cas de capteurs fabriqués en matière plastique traitée à surface conductrice, et la capacité électrique, dans celui de capteurs dont le fonctionnement repose sur la variation des propriétés diélectriques d'un solide hygroscopique en fonction de l'humidité relative ambiante.

4.1.4.8 Absorption du rayonnement électromagnétique par la vapeur d'eau (hygromètres à ultraviolet et à infrarouge)

Les molécules d'eau absorbent le rayonnement électromagnétique dans une gamme de bandes d'ondes et à des longueurs d'onde spécifiques. Il est possible de tirer parti de cette propriété pour mesurer la concentration moléculaire de la vapeur

d'eau dans un gaz. Les régions du spectre électromagnétique se prêtant le mieux à ce type d'application se situent dans l'ultraviolet et l'infrarouge. Le principe appliqué consiste à déterminer l'atténuation du rayonnement dans une bande d'ondes correspondant à la bande d'absorption de la vapeur d'eau, le long d'un trajet optique entre la source du rayonnement et un récepteur. Il existe principalement deux méthodes pour déterminer le degré d'atténuation du rayonnement :

- a) La transmission d'un rayonnement de bande étroite et d'intensité fixe à un récepteur étalonné ;
- b) La transmission d'un rayonnement à deux longueurs d'onde, l'une caractérisée par une forte absorption par la vapeur d'eau et l'autre par une absorption soit nulle soit très faible.

Les deux types d'instruments nécessitent de fréquents étalonnages et conviennent mieux à la mesure des variations de la concentration de vapeur qu'à celle de valeurs absolues. Ils ne sont utilisés que dans le domaine de la recherche. Ils sont néanmoins brièvement décrits à la section 4.7.

4.1.4.9 Constantes de temps des capteurs d'humidité

Pour que l'on puisse préciser la constante de temps d'un capteur d'humidité, le temps de réponse du capteur à un changement brusque spécifié de l'humidité doit correspondre à une fonction connue. En général, le terme désigne le temps que prend le capteur pour indiquer 63,2 % (1/e) d'une variation échelonnée de la grandeur à mesurer (l'humidité dans le cas présent), étant entendu que le capteur fournit une réponse du premier ordre à la variation que subit la grandeur à mesurer (c'est-à-dire que la vitesse de variation de la grandeur mesurée est proportionnelle à la différence entre la grandeur mesurée et la grandeur à mesurer). Il est donc possible de prévoir que 99,3 % de la variation sera prise en compte au bout d'une durée correspondant à cinq fois la constante de temps.

Le tableau 4.2 fournit les valeurs types de la fonction (1/e) de la constante de temps pour divers capteurs d'humidité.

4.1.4.10 Maintenance générale

Les méthodes de maintenance suivantes devraient être appliquées :

- a) Propreté : Les capteurs et leurs enveloppes doivent être tenus propres. Pour certains capteurs, tels que les hygromètres à miroir et les hygromètres à cheveux, il convient de procéder à un nettoyage régulier avec de l'eau distillée. Pour d'autres, notamment ceux équipés d'une forme quelconque de revêtement électrolytique, mais aussi ceux comprenant un substrat

Tableau 4.2.
Constantes de temps des capteurs d'humidité

Humidité relative de 85 %	Fonction 1/e de la (des) constante(s) de temps		
Type de capteur	20 °C	0 °C	-20 °C
Cheveux ordinaires	32	75	440
Cheveux laminés	10	10	12
Peau de batteur d'or	10	16	140
Capacité électrique	1-10	1-10	1-10
Résistance électrique	1-10	—	—
Psychromètre d'Assmann	30-50	30-50	30-50
Hygromètres à condensation			
Hygromètres électrolytiques			
Hygromètre optique	< 0,01	< 0,01	< 0,01

• Note : La relation du premier ordre n'est pas particulièrement bien vérifiée dans le cas des capteurs à sorption, car le facteur de forçage tendant à un équilibre de la vapeur, à savoir le gradient local de la tension de vapeur, est fonction de la migration locale des molécules de vapeur d'eau dans le corps de l'élément sensible à l'humidité. En général, les réponses se rapprochent le plus d'une réponse du premier ordre sont fournies par des capteurs disposant d'un élément sensible actif fin.

polymère, il ne faut surtout pas procéder de la sorte. Il est donc essentiel de fournir des instructions claires et précises à ce sujet aux observateurs et au personnel de maintenance ;

b) Vérification et étalonnage des instruments d'observation : Tous les capteurs d'humidité utilisés sur le terrain nécessitent un étalonnage périodique. Pour ce qui est des psychromètres et des hygromètres chauffants à point de rosée ou à miroir, équipés d'un détecteur de température, l'étalonnage du détecteur pourra être contrôlé à chaque opération périodique de maintenance. Il faudrait en outre comparer l'instrument avec un étalon de travail, tel qu'un psychromètre d'Assmann, au moins une fois par mois.

Il est possible d'utiliser des solutions salines saturées pour vérifier les capteurs ne nécessitant qu'un échantillon de faible volume. La température ambiante devant demeurer constante au cours d'une telle vérification, il est difficile d'utiliser ces solutions sur le terrain.

Il y a tout intérêt à employer comme étalon de travail un psychromètre à aspiration de type standard, tel que celui d'Assmann. En effet, il est facile de vérifier l'intégrité de cet instrument par la comparaison des thermomètres sec et mouillé qui le composent et on peut en outre estimer que l'aspiration fonctionne bien lorsque le ventilateur produit un son normal. Il y a lieu d'établir l'instrument de référence à un intervalle approprié en fonction du type auquel il appartient.

Il importe de vérifier périodiquement l'étalonnage des interfaces électriques pour toute l'étendue de mesure. À cet effet, il est possible d'utiliser un simulateur à la place du capteur. Il demeurerà cependant indispensable d'établir l'ensemble capteur-interface à des points sélectionnés, car des erreurs jugées négligeables au cours des étalonnages distincts des deux composants pourraient, par leur cumul, entraîner un fonctionnement hors spécifications.

Les exigences détaillées quant à la maintenance propre à chaque classe d'hygromètre décrite dans le présent chapitre figurent dans les sections appropriées.

4.1.4.11 Filtres de protection

D'ordinaire, les capteurs d'humidité sont équipés d'un filtre destiné à les protéger contre les contaminants qui risqueraient d'abaisser leurs performances. Lorsqu'un capteur n'est pas ventilé par un moyen artificiel, l'équiper d'un filtre tend à augmenter son temps de réponse puisque l'air ne circule plus librement et que la vapeur d'eau atteint alors l'élément sensible par diffusion moléculaire à travers le matériau filtre. Bien que la diffusion de la vapeur d'eau à travers certains matériaux, tels que des matières cellulosiques, se produise en théorie plus rapidement que dans un air calme, la pratique montre que les meilleures vitesses de diffusion sont atteintes à travers des membranes poreuses hydrophobes. Les pores devraient être suffisamment petits pour que le filtre retienne les aérosols indésirables — dans un environnement marin, il est possible de trouver de grandes quantités de particules de sel marin dont le diamètre minimal peut atteindre $0,1 \mu\text{m}$ — et la porosité, adéquate pour permettre une vitesse de diffusion suffisante.

La dimension du filtre ainsi que sa porosité déterminent la vitesse de diffusion globale. L'aspiration améliore la diffusion, mais il faut se rappeler que le filtre est alors soumis à une faible pression du côté du capteur, ce qui peut avoir un effet important sur la mesure.

Il convient en général de protéger les capteurs non ventilés à l'aide d'un matériau inerte et hydrophobe. À cet effet, des membranes polymères à forte porosité, en polytétrafluoréthylène (PTFE) expansé, ont donné satisfaction dans diverses situations et sont relativement solides.

Il est possible d'employer des filtres en métal fritté, mais il convient de les chauffer pour éviter tout problème de condensation. Ces filtres ne sont pas adaptés normalement aux capteurs d'humidité relative, mais ils conviennent tout à fait aux capteurs

de point de rosée. Les filtres en métal fritté sont solides et bien adaptés aux applications faisant appel à l'aspiration qui permettent d'utiliser des filtres de grande surface présentant par conséquent une différence de pression suffisamment faible pour être acceptable.

Lorsque l'aspiration n'améliore pas la diffusion, il faut alors tenir compte de la relation entre la superficie du filtre et le volume d'air échantillonné par le capteur. Dans le cas d'un capteur à sorption type, composé d'un substrat plat, une membrane plate placée près de la surface du capteur représente la configuration optimale. Dans le cas d'une surface sensible cylindrique, il y a lieu d'employer un filtre cylindrique.

4.2 PSYCHROMÈTRE

4.2.1 Généralités

4.2.1.1 Formules et tables psychrométriques

On trouvera dans les paragraphes ci-après un résumé des méthodes employées actuellement pour établir les tables psychrométriques.

Habituellement, dans les conditions d'observation, on obtient la tension de vapeur e' par les formules semi-empiriques :

$$e' = e'_{w} (p, T_w) - Ap (T - T_w) \quad (4.1)$$

et :

$$e' = e'_{i} (p, T_i) - Ap (T - T_i) \quad (4.2)$$

où e'_{w} est la tension de vapeur saturante par rapport à l'eau, à la pression p et à la température T_w du thermomètre mouillé, e' est la tension de vapeur saturante par rapport à la glace, à la pression p et à la température T_i du thermomètre recouvert de glace, p est la pression atmosphérique et T la température du thermomètre sec, enfin A est le coefficient psychrométrique. (Cette dernière expression est préférable à « constante psychrométrique » utilisée couramment, mais incorrecte.)

Pour la plupart des instruments, la température T_w du thermomètre mouillé ne correspond pas à la température thermodynamique du thermomètre mouillé définie dans l'annexe 4.A et qui est uniquement fonction de p , T et r (le rapport de mélange). La température mesurée par un thermomètre mouillé destiné à un usage pratique est fonction aussi d'un certain nombre de paramètres liés à la dynamique de l'échange thermique à l'interface liquide-gaz (le gaz étant caractérisé par les couches laminaires et

turbulentes qui le composent). Mais l'objet n'est pas de décrire ici un modèle thermodynamique satisfaisant. Dans la pratique, le coefficient psychrométrique A , établi de façon empirique, élimine la différence entre la température thermodynamique du thermomètre mouillé et la température mesurée du thermomètre mouillé (voir section 4.2.6).

En général, le coefficient A dépend du type de psychromètre (notamment du système retenu comme thermomètre mouillé), du flux d'air au niveau du réservoir mouillé, ainsi que de la température et de l'humidité de l'air. Lorsque la vitesse de l'air aspiré est faible, le coefficient dépend notablement de cette vitesse. Mais à des vitesses de 3 à 5 $m s^{-1}$ (pour les thermomètres de dimension courante) ou plus élevées, la valeur de A devient, en fait, indépendante de la vitesse de l'air aspiré et reste presque identique pour tous les psychromètres bien conçus. La valeur de A ne dépend alors plus que dans une faible mesure de la température et de l'humidité et sa dépendance vis-à-vis de ces variables est habituellement considérée comme insignifiante. Le coefficient A est plus petit quand le thermomètre est recouvert de glace que lorsqu'il est recouvert d'eau.

On examine dans ce qui suit les formules et coefficients qui s'appliquent aux divers types de psychromètres.

4.2.1.2 Caractéristiques d'un psychromètre

L'équipement employé pour les observations psychrométriques devrait, autant que possible, être conforme aux recommandations suivantes (voir les sections 4.2.3 et 4.2.6) :

- a) Au niveau de la mer, lorsque les thermomètres utilisés sont d'un modèle ordinaire en usage dans les stations météorologiques, l'air devrait être aspiré à une vitesse comprise entre 2,2 $m s^{-1}$ au moins et 10 $m s^{-1}$ au plus au niveau des réservoirs. À des altitudes sensiblement différentes, il convient d'adapter ces limites de vitesse d'une manière inversement proportionnelle à la densité de l'atmosphère ;
- b) Il faut protéger les thermomètres sec et mouillé des effets du rayonnement, de préférence à l'aide d'au moins deux écrans. Dans le cas d'un psychromètre à aspiration, tel celui d'Assmann, les écrans peuvent être en métal poli et non peint, et séparés des autres parties de l'appareil par un isolant. En principe, il est préférable d'employer un isolant thermique, ce qui est indispensable dans le cas des psychromètres sans ventilation artificielle ;
- c) Quand le psychromètre est logé dans un abri à personnes doté d'une ventilation forcée, des conduits séparés devraient être aménagés pour

- les deux thermomètres. L'entrée des conduits devrait être située de façon à ce que les thermomètres mesurent la température réelle ambiante et leur sortie située au-dessus de l'abri, de façon à empêcher la recirculation de l'air évacué ;
- d) Il convient de prendre toutes les précautions pour empêcher tout transfert thermique appréciable du moteur du ventilateur aux thermomètres ;
 - e) Le réservoir à eau et la mèche devraient être disposés de telle façon que l'eau atteigne le thermomètre mouillé à peu près à la même température que ce dernier et qu'ils n'aient aucune influence sur la température du thermomètre sec.

4.2.1.3 Manchon du thermomètre mouillé

Le thermomètre mouillé est d'ordinaire équipé d'une mèche ou mousseline en coton, ou autre tissu comparable, bien ajusté autour de l'élément sensible pour y maintenir appliquée une fine couche d'eau uniforme, soit directement, soit par capillarité à partir d'un réservoir d'eau. La mèche forme en général un manchon bien ajusté autour du réservoir du thermomètre mouillé, débordant d'au moins deux centimètres sur la tige du thermomètre.

Le tissu utilisé pour couvrir le thermomètre mouillé devrait être mince, mais d'une trame serrée. Avant sa mise en place, il devrait être parfaitement lavé dans une solution aqueuse de bicarbonate de soude (NaHC_03) dilué à raison de 5 g par litre d'eau et rincé à plusieurs reprises à l'eau distillée. Il est possible aussi de le laver au savon pur et à l'eau. Si une mèche est employée, elle devrait subir le même traitement.

Toute souillure visible sur la mèche ou le manchon entourant le réservoir du thermomètre mouillé doit entraîner leur remplacement. Il faut apporter un grand soin à la manipulation du manchon et de la mèche pour éviter de les salir avec les mains. Il y a lieu d'utiliser de l'eau distillée pour humecter le manchon du thermomètre mouillé.

Il est particulièrement important de bien entretenir le thermomètre mouillé. Il faudrait encourager les observateurs à changer régulièrement le manchon et la mèche. Un remplacement au minimum hebdomadaire s'impose pour tous les psychromètres exposés en continu. Près de la mer et dans les régions où il y a beaucoup de poussière ou d'industries, il peut être nécessaire d'effectuer ce remplacement plus fréquemment. Il convient de contrôler souvent l'eau du réservoir et d'en rajouter ou de la remplacer au besoin.

Par temps sec et chaud, il peut être bon d'humecter le manchon à partir d'un récipient poreux. L'eau

sera ainsi refroidie par évaporation à la surface du matériau poreux avant d'atteindre le thermomètre. Il convient de tenir le récipient à l'ombre, mais pas trop près du psychromètre.

4.2.1.4 Emploi du thermomètre mouillé à des températures inférieures à 0 °C

Bien que difficile à employer à des températures inférieures à 0 °C, le psychromètre est en usage dans des régions où de telles températures sont observées. Lorsque la température du thermomètre mouillé est inférieure à 0 °C, on ne peut utiliser une mèche pour amener par capillarité l'eau du réservoir au manchon du thermomètre mouillé. Dans ces conditions, il faudrait veiller à ce qu'il ne se forme qu'une mince couche de glace sur le manchon. Il faut absolument que les thermomètres soient ventilés artificiellement : dans le cas contraire, il est extrêmement difficile de faire fonctionner le thermomètre mouillé.

Autant que possible, l'eau devrait avoir une température proche du point de congélation. Si un bouton de glace se forme à la partie inférieure du réservoir, il y a lieu de tremper le réservoir dans l'eau assez longtemps pour que la glace fonde.

Le temps nécessaire pour que le thermomètre mouillé se stabilise après que le manchon a été humecté est fonction de la ventilation et de la température réelle du thermomètre mouillé. Un thermomètre non ventilé demande habituellement entre un et trois quarts d'heure, alors qu'un thermomètre à aspiration n'aura besoin que d'un laps de temps beaucoup plus court. Il est essentiel qu'une nouvelle pellicule de glace se forme sur le réservoir au moment voulu. Quand les observations ont lieu chaque heure à l'aide d'un psychromètre simple, il sera en général préférable de provoquer la formation d'une nouvelle pellicule de glace immédiatement après chaque observation. En cas d'observations plus espacées, l'observateur devra se rendre à l'abri suffisamment tôt avant chaque observation pour provoquer la formation d'une nouvelle pellicule de glace sur le réservoir. Le thermomètre mouillé des psychromètres à aspiration et de ceux du type fronde devrait être humecté immédiatement avant l'emploi.

Il est possible d'empêcher ou de ralentir l'évaporation de la pellicule de glace soit en enfermant le thermomètre mouillé dans un petit tube de verre, soit en fermant l'orifice d'aspiration entre les observations (cette deuxième façon de procéder ne pouvant être appliquée si elle risque de provoquer une surchauffe du ventilateur).

L'effet de l'eau surfondue sur le thermomètre mouillé peut être traité suivant deux méthodes :

- a) On peut utiliser des tables différentes selon

que le thermomètre mouillé est recouvert de glace ou d'eau surfondue. Pour déterminer quelle table employer, l'observateur devra, dès l'observation terminée, toucher le thermomètre mouillé d'un cristal de neige, de la pointe d'un crayon ou de tout autre objet. Si la température s'élève jusque vers 0 °C, puis redescend, l'observateur peut présumer que l'eau sur le thermomètre mouillé était surfondue au moment de l'observation ;

- b) On peut aussi utiliser la table qui correspond à la présence d'une pellicule de glace sur le thermomètre mouillé et provoquer la congélation de l'eau surfondue de la même façon que dans la méthode a). Pour gagner du temps et s'assurer que le réservoir du thermomètre est recouvert de glace, l'observateur devrait veiller à provoquer la congélation de l'eau à chaque observation, aussitôt que possible après l'humidification du réservoir. D'après le comportement du thermomètre humecté au point de congélation, on peut d'ordinaire déterminer si le réservoir est recouvert de glace ou d'eau surfondue. Cependant la méthode recommandée est d'amorcer la congélation de l'eau à chaque observation, lorsque l'on estime que la température du thermomètre mouillé est inférieure à 0 °C, que l'on observe ou non la réaction du thermomètre après humidification.

La première méthode est habituellement la plus rapide, mais elle nécessite l'emploi de deux tables, ce qui peut créer quelque confusion.

4.2.1.5 Méthode générale d'observation

Il convient de suivre les procédures indiquées dans le chapitre 2 de la Partie I, relativement à la mesure de la température, et, en outre :

- a) S'il y a lieu de remplacer le manchon, la mèche ou l'eau du thermomètre mouillé, il faut le faire suffisamment longtemps avant l'observation. Le laps de temps qu'il faut au thermomètre mouillé pour indiquer la température appropriée est fonction du type du psychromètre utilisé ;
- b) Il faut lire les thermomètres au dixième de degré près ;
- c) Au cours de l'observation, il convient, autant que possible, de lire simultanément les deux thermomètres. On devrait s'assurer que le thermomètre mouillé reçoit suffisamment d'eau.

4.2.1.6 Emploi de thermomètres à résistance électrique

Les thermomètres de précision à résistance électrique en platine sont largement utilisés en remplacement des thermomètres à mercure sous verre, en particulier pour les applications qui nécessitent une lecture

à distance et un mesurage en continu. Il faut veiller à ce que les appareils et les circuits électriques d'interface sélectionnés satisfassent les critères de performance dont le détail figure dans le chapitre 2 de la Partie I, relatif à la mesure de la température. Il y a lieu de toujours prendre des précautions spéciales en ce qui concerne l'effet d'échauffement spontané que subissent les thermomètres électriques.

Les formules psychrométriques (voir Annexe 4.B) s'appliquant aux psychromètres à aspiration de type Assmann sont également valables lorsque des thermomètres à résistance électrique en platine remplacent les instruments à mercure sous verre, la configuration des composants, y compris les thermomètres, étant différente. La formule s'appliquant au thermomètre mouillé (eau) est également valable pour certains psychromètres à aspiration transversale (OMM/TD-N° 289).

4.2.1.7 Causes d'erreur en psychrométrie

Les principales sources d'erreur suivantes doivent être prises en compte :

- a) Erreurs instrumentales des thermomètres. Dans les mesures psychrométriques, il est très important de connaître les erreurs instrumentales des thermomètres pour toute la gamme réelle des températures et d'appliquer aux lectures les corrections appropriées avant d'employer les tables d'humidité.

Toute autre erreur affectant la température du thermomètre mouillé ou du thermomètre recouvert de glace causée par d'autres effets prendra la même forme que les erreurs instrumentales. Le tableau 4.3 indique, en pourcentage et pour une gamme de températures vraies de l'air (quand le thermomètre sec est sensé fournir la température vraie de l'air), l'erreur $\epsilon(U)$ qu'engendre, dans la détermination de l'humidité relative, une erreur $\epsilon(t_x)$, où x représente l'eau pour $t > 0$ °C ou la glace pour $t < 0$ °C, de 0,5 et de 0,1 K découlant respectivement de mesures de la température du thermomètre mouillé et du thermomètre recouvert de glace, l'humidité relative U étant de 50 %.

- b) Coefficients de retard des thermomètres. Pour que les psychromètres présentent une grande exactitude, il est conseillé de faire en sorte que les thermomètres sec et mouillé aient à peu près le même coefficient de retard. Si les réservoirs sont de mêmes dimensions, le thermomètre mouillé a un coefficient de retard sensiblement plus faible que le thermomètre sec.
- c) Erreurs dues à la ventilation. Les erreurs dues à une ventilation insuffisante s'aggravent considérablement lorsque des tables d'humidité inappropriées sont employées (voir les sections portant sur les divers types de psychromètres).

Tableau 4.3.

Erreurs dans l'humidité relative déduite découlant d'une erreur instrumentale $\varepsilon(t_x)$ affectant la mesure de la température du thermomètre mouillé ou recouvert de glace, pour $U = 50\%$

Température de l'air en °C	Erreurs dans l'humidité relative $\varepsilon(U)$ en % découlant d'une erreur affectant la mesure de la température du thermomètre mouillé ou recouvert de glace	
	$\varepsilon(T_x) = 0,5 \text{ K}$	$\varepsilon(T_x) = 0,1 \text{ K}$
-30	60	12
-20	27	5
-10	14	3
0	8	2
10	5	1
20	4	0,5
30	3	0,5
40	2	0,5
50	2	0

- d) Erreurs dues à un épais dépôt de glace sur le thermomètre mouillé. Un épais dépôt de glace sur le réservoir augmente le retard du thermomètre, aussi faut-il faire fondre immédiatement la glace en trempant le réservoir dans de l'eau distillée.
- e) Erreurs dues à la souillure du manchon du thermomètre mouillé ou à l'impureté de l'eau. La présence de substances pouvant modifier la tension de vapeur de l'eau risque de causer des erreurs importantes. Le thermomètre mouillé avec son manchon devrait être lavé à intervalles réguliers dans de l'eau distillée afin d'éliminer les impuretés solubles, cette opération demandant à être renouvelée plus fréquemment dans certaines régions, au voisinage de la mer ou dans celles soumises à une pollution atmosphérique par exemple.
- f) Erreurs dues à la conduction thermique de la tige du thermomètre vers le réservoir mouillé. La conduction de la chaleur de la tige du thermomètre vers le réservoir mouillé réduit la différence psychrométrique, l'humidité relative déduite étant alors trop élevée. L'effet est le plus prononcé pour une faible humidité relative. Il est cependant possible de l'éliminer en faisant en sorte que le manchon qui recouvre le réservoir du thermomètre mouillé déborde d'au moins deux centimètres sur la tige du thermomètre.

4.2.2 Psychromètre à aspiration d'Assmann

4.2.2.1 Description

Ce psychromètre se compose de deux thermomètres à mercure sous verre montés verticalement, côte à

côte, sur un support en métal chromé ou nickelé poli et connectés par des conduits à un ventilateur. Le ventilateur peut être entraîné par un ressort ou par un moteur électrique. Le réservoir de l'un des thermomètres est recouvert d'une mousseline bien ajustée, que l'on humecte avec de l'eau distillée avant d'utiliser le thermomètre. Par protection contre le rayonnement thermique externe, chaque thermomètre est logé dans deux tubes métalliques coaxiaux, d'un poli intérieur et extérieur spéculaire. Les tubes sont séparés l'un de l'autre par un isolant thermique.

Une comparaison internationale de psychromètres du type Assmann utilisés par dix pays, organisée par l'OMM, a montré (OMM/TD-N° 289) une bonne concordance entre les mesures des températures du thermomètre mouillé et du thermomètre sec exécutées à l'aide de psychromètres dont les dimensions sont proches des spécifications d'origine et dans lesquels la vitesse de l'air aspiré est supérieure à $2,2 \text{ m s}^{-1}$. Parmi les appareils disponibles dans le commerce, certains ne répondent pas entièrement à ces critères. Dans son ouvrage, Sonntag (OMM/TD-N° 289) présente une étude détaillée de la question. Sur le terrain, le psychromètre d'Assmann permet d'atteindre l'incertitude cible précisée dans le tableau 4.1 et de nettement la dépasser si un grand soin est apporté à la mesure.

L'annexe 4.B fournit la liste des formules types à utiliser pour le calcul de l'humidité à partir des mesures exécutées à l'aide d'un psychromètre d'Assmann⁴ et d'autres types de psychromètres à aspiration forcée, en l'absence d'autres solutions bien établies.

4.2.2.2 Méthode d'observation

La mèche, qui doit être exempte de graisse, est humidifiée avec de l'eau distillée. Toute mèche souillée ou durcie doit être remplacée. Il faut veiller à ce que l'eau transportée par la mèche n'entre pas en contact avec l'écran de protection contre le rayonnement.

Il faut aussi vérifier que la colonne de mercure des thermomètres n'est pas fractionnée, ce qu'il convient de corriger le cas échéant, notamment par le remplacement du thermomètre.

En mode de fonctionnement, les thermomètres qui constituent le psychromètre se trouvent normalement en position verticale. Il y a lieu de protéger du rayonnement solaire les tiges des thermomètres en tournant l'instrument de façon que les écrans latéraux se trouvent dans la direction du soleil. Il

⁴ Formules dont la Commission des instruments et des méthodes d'observation a recommandé l'utilisation à sa dixième session (1989).

convient d'incliner l'instrument pour que les orifices d'aspiration soient placés dans la direction d'où vient le vent, tout en veillant à ce que les réservoirs des thermomètres demeurent à l'abri du rayonnement solaire. Par vents forts, il est nécessaire d'utiliser un écran contre le vent si le ventilateur est sensible à de telles conditions.

Le psychromètre doit être à la même température que l'air qui l'entoure. Quand la température de l'air est supérieure à 0 °C, l'aspiration forcée doit fonctionner durant trois minutes au moins avant que la lecture ait lieu. Au-dessous de 0 °C, il faut attendre que le processus de congélation prenne fin et vérifier si la mèche est couverte d'eau ou de glace. Au cours des processus de congélation et de décongélation, la température du thermomètre mouillé demeure constante à 0 °C. Lorsque le mesurage se déroule à l'extérieur, il convient de le répéter à plusieurs reprises, puis de prendre comme résultat la moyenne des valeurs obtenues. Les thermomètres devraient être lus au dixième de kelvin près ou mieux.

Voici comment se résume la méthode d'observation :

- a) Humecter le thermomètre mouillé ;
- b) Remonter le mouvement d'horlogerie (ou mettre en marche le moteur électrique) du ventilateur ;
- c) Attendre deux à trois minutes ou jusqu'à ce que l'indication du thermomètre mouillé se soit stabilisée ;
- d) Lire le thermomètre sec ;
- e) Lire le thermomètre mouillé ;
- f) Vérifier la lecture du thermomètre sec.

4.2.2.3 Installation et exposition

Avec un psychromètre du type Assmann, l'observation devrait être faite dans un emplacement dégagé, l'instrument étant soit suspendu à un crochet ou à un support fixé à un poteau mince, soit tenu d'une main à bout de bras avec les orifices d'aspiration légèrement inclinés dans la direction d'où vient le vent. Ces orifices devraient se trouver à une hauteur de 1,2 à 2 m au-dessus du sol, dans le cas d'un mesurage normal de la température et de l'humidité de l'air.

Il faut bien prendre garde que les lectures ne soient faussées par la présence de l'observateur ou la proximité de toute autre source de chaleur et de vapeur d'eau, telle que l'échappement d'un véhicule à moteur.

4.2.2.4 Étalonnage

Il convient de vérifier régulièrement le système de ventilation, au moins une fois par mois.

Il convient aussi de vérifier régulièrement l'étalonnage des thermomètres. Il est possible de les com-

parer l'un à l'autre pour la mesure de la température du thermomètre sec. Il faudrait les comparer à un thermomètre de référence certifié au moins une fois par an.

4.2.2.5 Maintenance

Entre les lectures, l'instrument devrait être conservé dans une pièce non chauffée ou, sinon, protégé contre les précipitations et le fort rayonnement. Lorsque l'instrument n'est pas utilisé, il faudrait le placer dans un étui solide, tel que celui fourni par le fabricant, que l'on conservera à l'intérieur d'un local.

4.2.3 Psychromètre sous abri

4.2.3.1 Description

Ce psychromètre se compose de deux thermomètres à mercure sous verre montés verticalement dans un abri météorologique. Le diamètre des réservoirs devrait être d'environ 10 mm. Le réservoir de l'un des thermomètres est recouvert d'un manchon bien ajusté débordant d'au moins 20 mm sur la tige du thermomètre. Quand l'instrument est équipé d'une mèche et d'un réservoir à eau pour maintenir humide le manchon couvrant le thermomètre mouillé, le réservoir devrait être placé de préférence sur le côté du thermomètre, son orifice étant au même niveau ou légèrement plus bas que le sommet du réservoir du thermomètre. La mèche devrait être maintenue aussi droite que possible et sa longueur devrait être telle que l'eau atteigne le réservoir du thermomètre mouillé à peu près à la même température que celle de ce dernier et en quantité suffisante (mais non excessive). Si l'instrument ne comporte pas de mèche, il convient de protéger le thermomètre mouillé de la saleté en enfermant, entre les lectures, son réservoir dans un petit tube de verre.

Il est recommandé d'utiliser sous abri des psychromètres à aspiration forcée. La vitesse de l'air aspiré aux deux thermomètres devrait atteindre 3 m s^{-1} . Pour cela, on utilise couramment des ventilateurs électriques ou à ressort. Au niveau des réservoirs des thermomètres, l'air devrait circuler horizontalement et non verticalement. Il devrait être évacué en outre de façon à empêcher sa recirculation.

Le psychromètre sous abri peut donner des résultats dont l'exactitude est bien moins bonne que celle indiquée dans le tableau 4.1, en particulier par vent faible lorsque l'abri n'est pas équipé d'une ventilation forcée.

Les formules psychrométriques précisées à la section 4.2.1.1 s'appliquent aux psychromètres sous abri, mais une grande incertitude affecte les coef-

ficients. Bindon (1965) fournit un sommaire de quelques-unes de ces formules. Si une ventilation forcée permet à l'air d'atteindre au moins 3 m s^{-1} au niveau du réservoir du thermomètre mouillé, il est possible d'appliquer les valeurs indiquées dans l'annexe 4.B, avec un coefficient psychrométrique de $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ pour l'eau. On utilise cependant des valeurs allant de $6,50$ à $6,78 \cdot 10^{-4}$ pour une température du thermomètre mouillé supérieure à 0°C , mais de $5,70$ à $6,53 \cdot 10^{-4}$ pour une température du thermomètre mouillé inférieure à 0°C . Dans le cas des psychromètres sous abri sans ventilation artificielle, les coefficients employés varient entre $7,7$ et $8,0 \cdot 10^{-4}$ pour une température supérieure à 0°C et entre $6,8$ et $7,2 \cdot 10^{-4}$ pour une température inférieure à 0°C , et ce lorsque l'air circule dans l'abri, ce qui est probablement presque toujours le cas. Toutefois, l'emploi de coefficients allant jusqu'à $12 \cdot 10^{-4}$ pour l'eau et $10,6 \cdot 10^{-4}$ pour la glace a été préconisé quand l'air ne circule pas dans l'abri.

Il est possible de déterminer le coefficient psychrométrique qui convient à une configuration particulière de l'abri, à la forme du réservoir du thermomètre mouillé et à la vitesse de l'air aspiré par comparaison avec un étalon de référence ou de travail approprié. Il faut s'attendre néanmoins à obtenir ainsi des données très dispersées et prévoir un très large échantillonnage pour atteindre un résultat fiable. Le coefficient psychrométrique peut avoir été obtenu grâce à un tel échantillonnage, il n'en demeure pas moins un large intervalle de confiance pour une quelconque observation. Il sera donc peu justifiable de s'écartez des pratiques établies à l'échelon national.

4.2.3.2 Méthode d'observation spéciale

La méthode décrite à la section 4.2.1.5 s'applique au psychromètre sous abri. Dans le cas d'un thermomètre mouillé sans aspiration artificielle, à condition que l'eau ait à peu près la même température que l'air, la température exacte du thermomètre mouillé sera atteinte en 15 minutes environ après que l'on aura ajusté un nouveau manchon. Si la température de l'eau diffère largement de la température de l'air, il pourra être nécessaire d'attendre 30 minutes.

4.2.3.3 Installation et exposition

L'installation et l'exposition de l'abri sont décrites au chapitre 2 de la Partie I.

4.2.4 Psychromètre fronde ou crêcelle

4.2.4.1 Description

Un petit psychromètre portatif de type fronde ou crêcelle se compose de deux thermomètres à mercure sous verre supportés par une monture robuste

fixée au bout de l'axe d'une poignée située à l'extrémité de la monture la plus éloignée des réservoirs des thermomètres et permettant de faire tourner rapidement la monture et les thermomètres suivant un axe de rotation horizontal.

La configuration du thermomètre mouillé varie suivant les types d'instruments. Dans certains cas, le réservoir du thermomètre mouillé est protégé du rayonnement solaire direct par un écran, ce qui est préférable pour les mesures météorologiques.

Il est possible d'appliquer à ces instruments les formules psychrométriques indiquées dans l'annexe 4.B.

4.2.4.2 Méthode d'observation

Les directives suivantes devraient être appliquées :

- a) Toutes les instructions ayant trait à la manipulation des psychromètres du type Assmann à aspiration forcée s'appliquent aussi aux psychromètres frondes ;
- b) Les psychromètres frondes non équipés d'un écran destiné à protéger les réservoirs des thermomètres contre le rayonnement solaire de vraient être protégés d'une autre manière ;
- c) Il convient de lire les thermomètres dès que l'on cesse de les ventiler, car la température du thermomètre mouillé commence à s'élever immédiatement et il est probable que les thermomètres subissent en outre les effets du rayonnement solaire.

4.2.5 Psychromètre chauffant

Le psychromètre chauffant fonctionne selon le principe suivant : la teneur en vapeur d'eau d'un volume d'air demeure constante si celui-ci est chauffé. Ainsi est-il inutile de disposer d'un réservoir recouvert de glace lorsque la température est inférieure à 0°C .

4.2.5.1 Description

L'air est aspiré dans un conduit sur un élément électrique chauffant, puis dans une enceinte de mesure qui contient les thermomètres sec et mouillé ainsi qu'un réservoir à eau. Le circuit de commande de l'élément chauffant est étalonné de sorte que la température de l'air ne puisse descendre sous une valeur donnée, ordinairement établie à 10°C . Le réservoir d'eau est de la même façon maintenu à la même température. Ainsi, ni l'eau contenue dans le réservoir, ni celle qui humecte la mèche ne gèle, à condition que la différence psychrométrique soit inférieure à 10 K et que le psychromètre continue de fonctionner normalement lorsque la température de l'air descend au-dessous de 0°C . À une température supérieure à 10°C , l'élément chauffant peut s'éteindre automatiquement et l'instrument fonctionner comme un psychromètre ordinaire.

Ce type d'appareil utilise des thermomètres électriques qu'il est possible de loger entièrement dans l'enceinte de mesure et qui rendent inutile une lecture directe.

Un second thermomètre sec est placé à l'entrée du conduit pour mesurer la température de l'air ambiant, ce qui permet de déterminer l'humidité relative ambiante.

Les réservoirs des thermomètres du psychromètre chauffant sont ventilés dans une direction axiale, l'air atteignant une vitesse voisine de 3 m s^{-1} .

4.2.5.2 Méthode d'observation

Ce type de psychromètre peut être employé dans des stations météorologiques automatiques.

4.2.5.3 Installation et exposition

L'instrument à proprement parler devrait être fixé à l'extérieur de l'abri météorologique. L'orifice d'aspiration, où la température de l'air ambiant est mesurée, devrait se trouver à l'intérieur de l'abri.

4.2.6 Psychromètre de référence de l'OMM

Wylie et Lalas (1992) ont décrit le psychromètre de référence et en ont fourni les consignes d'utilisation. Les éléments sec et mouillé sont logés dans une enveloppe de protection ventilée, de sorte que l'instrument est autonome. Le psychromètre de référence se distingue par le fait qu'il est possible de calculer le coefficient psychrométrique à partir de la théorie des échanges de chaleur et de masse qui s'opèrent au réservoir du thermomètre mouillé et que ce coefficient diffère de celui des autres psychromètres puisqu'il a pour valeur $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ pour une humidité relative de 50 %, à 20 °C et 1 000 hPa. Cet instrument donne une température du thermomètre mouillé très proche de la valeur théorique (voir les paragraphes 18 et 19 de l'annexe 4.A). Cela est rendu possible grâce à une évaporation particulièrement efficace au réservoir du thermomètre mouillé et à un apport de chaleur externe minimal. La forme étudiée du conduit et du réservoir du thermomètre mouillé ainsi que la vitesse de l'air aspiré déterminent la nature de l'écoulement d'air au niveau du réservoir du thermomètre mouillé. La face externe du double écran de protection est fortement réfléchissante, tandis que sa face interne est noircie. En outre les thermomètres sont entourés d'isolant et séparés par un écran. Les écrans et l'élément qui comprend le thermomètre mouillé sont en acier inoxydable afin d'en réduire la conduction thermique.

La méthode d'utilisation du psychromètre de référence permet d'éviter tout dépôt gras sur le réservoir

du thermomètre mouillé, et ce même à l'échelle des couches monomoléculaires, ce qui survient chaque fois que l'on manipule une pièce quelconque de l'instrument avec les doigts. Il est probable que ce soit principalement pour cette raison que le coefficient psychromètre de cet instrument est si proche de la valeur théorique et qu'il diffère des coefficients des autres instruments.

À l'aide du psychromètre de référence, il est possible d'atteindre une grande exactitude, le degré d'incertitude étant de l'ordre de 0,38 % pour une humidité relative de 50 % à 20 °C. L'OMM a en outre adopté cet instrument en tant que thermomètre de référence. Il est conçu pour une utilisation sur le terrain, mais non régulière. Seul le personnel qualifié pour mener des travaux très fins de laboratoire devrait l'utiliser. Son emploi en tant qu'instrument de référence est précisé à la section 4.9.7.

4.3 HYGROMÈTRE À CHEVEUX

4.3.1 Généralités

Tout corps absorbant tend à atteindre un état d'équilibre thermique et hygrométrique avec le milieu environnant. La tension de vapeur d'eau à la surface de ce corps est déterminée par la quantité d'eau absorbée par celui-ci et par sa température. Le transfert de molécules d'eau tend à éliminer toute différence entre cette tension et la tension de vapeur d'eau de l'air environnant.

On a constaté que la longueur des cheveux variait principalement en fonction de l'humidité relative de l'air par rapport à l'eau en phase liquide (même par températures négatives), et ce d'environ 2 à 2,5 % pour une humidité variant entre 0 et 100 %. Afin d'augmenter le rapport de la superficie d'un faisceau de cheveux à son volume et de diminuer le temps de réponse, ce qui est particulièrement important pour une utilisation de l'instrument à basse température, il est possible de laminer le faisceau de cheveux pour obtenir une section transversale de forme elliptique et de le nettoyer avec de l'alcool pour dissoudre les substances grasses. Cela fournit aussi une fonction de réponse plus linéaire, mais diminue la résistance à la traction. Pour obtenir des mesures relativement précises, il vaut mieux disposer d'un appareil équipé d'un seul cheveu. Toutefois, on utilise d'ordinaire des instruments équipés d'un faisceau de cheveux, car ils présentent une meilleure robustesse. Un traitement des cheveux au sulfure de baryum (BaS) ou au sulfure de sodium (Na_2S) apporte un gain de linéarité à la réponse de l'instrument.

L'hygrographe ou hygromètre à cheveux est considéré comme un instrument satisfaisant dans des situations où durant des périodes où des températures extrêmes et de très faibles humidités ne se présentent que rarement ou même jamais. Le mécanisme de l'instrument devrait être aussi simple que possible, même si cela nécessite l'emploi d'une échelle non linéaire ; cela est particulièrement important dans les régions industrielles, puisque les polluants atmosphériques peuvent agir sur la surface des pièces mobiles du mécanisme et augmenter le frottement.

Le temps de réponse de l'hygrographe à cheveux dépend pour une grande part de la température de l'air. Le retard de l'instrument à -10°C est approximativement trois fois plus grand que le retard à 10°C . Pour des températures de l'air comprises entre 0 et 30°C et des humidités relatives entre 20 et 80 %, un bon hygrographe, quand il est soumis à une variation brusque de l'humidité relative, devrait indiquer dans les trois minutes 90 % de la variation.

Un bon hygrographe en parfait état devrait pouvoir enregistrer l'humidité relative avec une exactitude de $\pm 3\%$ à des températures modérées et avec une exactitude inférieure par températures basses.

À basse température, pour que les mesures donnent des résultats utiles, il est indispensable de disposer d'un instrument équipé de cheveux laminés (voir la description ci-dessus).

4.3.2 Description

Les détails du mécanisme des hygromètres à cheveux varient suivant les fabricants. Certains instruments comprennent un transducteur qui fournit un signal électrique et peuvent aussi disposer d'une fonction de linéarisation pour fournir une réponse globale linéaire aux variations de l'humidité relative.

L'hygromètre à cheveux le plus utilisé est l'hygrographe. Celui-ci est constitué d'un faisceau de cheveux maintenu en légère tension par un petit ressort et relié au style inscripteur par un système amplifiant ses variations de longueur. Une plume est fixée à l'extrémité du style et maintenue au contact du diagramme ajusté sur un cylindre métallique ; elle enregistre ainsi les déplacements angulaires du style. Le cylindre tourne autour de son axe à une vitesse constante commandée par un mouvement d'horlogerie mécanique. La vitesse de rotation est en général égale à un tour par jour ou par semaine. Le diagramme porte en abscisse l'échelle de temps, qui s'étend donc sur la circonference du cylindre, et en ordonnée l'échelle d'humidité, parallèle donc à l'axe du cylindre ordinairement vertical.

Le mécanisme reliant le style au faisceau de cheveux peut comprendre des cames spécialement conçues pour convertir l'elongation non linéaire des cheveux découlant des variations de l'humidité en un déplacement angulaire linéaire du style.

Certains hygromètres utilisent des fibres synthétiques au lieu de cheveux. Quand il s'agit de cheveux, ceux-ci sont en général traités tout d'abord, comme cela est décrit à la section 4.3.1, afin d'améliorer la linéarité de la réponse et de diminuer le temps de réponse, ce traitement entraînant cependant une baisse de la résistance à la traction.

L'ensemble style et mouvement du cylindre repose sur une platine et il est normalement protégé par un carter muni d'une vitre destinée à faciliter la lecture de l'humidité enregistrée sans qu'il y ait à déplacer ou décapoter l'instrument. L'élément sensible à cheveux se trouve à l'extérieur du carter qui présente donc une ouverture à cet endroit. Le carter repose sur la platine à laquelle il n'est fixé que par une charnière située à l'extrémité opposée à l'élément sensible. Cette configuration permet l'accès au mouvement du cylindre et à l'élément sensible qui peut être en outre protégé par une cage à maille ouverte.

4.3.3 Méthode d'observation

Il faudrait toujours tapoter légèrement du doigt l'hygromètre à cheveux avant la lecture afin de libérer le mécanisme de toute tension résiduelle. Par contre, il faudrait, autant que possible, ne pas toucher l'hygrographe entre les changements de diagrammes, sauf pour tracer les repères chronologiques.

L'hygrographe et l'hygromètre permettent normalement de lire l'humidité relative au point de pourcentage le plus proche. Il convient d'attirer l'attention sur le fait que l'hygrographe à cheveux indique l'humidité relative par rapport à la saturation au-dessus de l'eau en phase liquide, même à des températures négatives.

L'humidité de l'air peut varier très rapidement et, par conséquent, il est très important de tracer avec beaucoup d'exactitude les repères chronologiques. Pour ce faire, le style ne devrait être déplacé que dans la direction de l'humidité relative décroissante sur le diagramme. Par un tel déplacement, les cheveux sont relâchés et c'est le ressort de tension qui applique la force qui rétablit le style dans sa position normale. Toutefois, le fait que le style ne retourne pas se placer dans sa position d'origine met en évidence un effet d'hystéresis.

4.3.4 Installation et exposition

L'hygrographe ou l'hygromètre devrait être placé dans un abri météorologique. Comme l'ammoniaque détruit les cheveux, il faut éviter d'installer les hygromètres à cheveux à proximité immédiate d'étables et d'installations industrielles qui utilisent cette substance.

Lorsqu'il est employé dans des régions polaires, l'hygrographe devrait être logé de préférence dans un abri météorologique spécial qui le protège suffisamment contre les précipitations et la chasse-neige basse. On peut, par exemple, recouvrir l'abri d'un filet à mailles fines (Mullergas) pour éviter une accumulation de cristaux de neige sur les cheveux et sur les surfaces de liaison de la tringlerie mécanique. Ce procédé n'est valable que s'il n'y a aucun risque que les cristaux de neige mouillent le filet en fondant.

4.3.5 Causes d'erreur

4.3.5.1 Variations du zéro

Le zéro de l'hygrographe est sujet à se décaler pour diverses raisons mal connues. La cause la plus probable est que les cheveux se sont étirés sous l'effet d'une tension excessive. Cela peut être le cas, par exemple, lorsqu'on trace les repères chronologiques sur le diagramme dans le sens de l'humidité relative croissante, ou encore lorsque le mécanisme de l'instrument se coince alors que l'humidité relative diminue. Le zéro peut aussi varier parce que l'hygrographe a séjourné longtemps dans de l'air très sec, auquel cas le remède consiste à conserver suffisamment longtemps l'instrument dans de l'air saturé.

4.3.5.2 Erreurs dues à une contamination des cheveux

La plupart des poussières sont de nature à provoquer des erreurs sensibles dans les observations (parfois jusqu'à 15 % d'humidité relative). Dans la majeure partie des cas, il est possible d'éliminer ou du moins de réduire l'erreur en nettoyant et en lavant les cheveux, mais les poussières peuvent aussi transporter des substances qui détruisent les cheveux (voir section 4.3.4).

4.3.5.3 Hystérésis

Tant la réponse de l'élément sensible à cheveux que le mécanisme d'enregistrement de l'hygromètre à cheveux présentent une hystérésis. Quant au mécanisme d'enregistrement, l'emploi d'un faisceau de cheveux permet de réduire l'hystérésis, puisqu'il est alors possible d'appliquer une tension relativement élevée aux cheveux pour éliminer l'effet du frottement. Il ne faut pas oublier que, tout comme le déplacement du levier qui entraîne le style, le frottement

entre la plume et le diagramme est amplifié, et que la tension appliquée aux cheveux doit être d'autant plus grande. Il faut aussi, pour réduire l'hystérésis, que le ressort de rappel soit bien réglé et que toutes les pièces de tringlerie qui transmettent l'elongation des cheveux fonctionnent correctement. Le point de pivotement principal et tout mécanisme de linéarisation constituent dans la tringlerie une source majeure de frottement.

Quant à l'élément sensible à cheveux, l'hystérésis est normalement un effet de courte durée découlant des processus d'absorption et de désorption. Elle n'est pas une cause importante d'erreur une fois l'équilibre de tension de vapeur établi. Il convient cependant de lire la section 4.3.5.1 pour ce qui est d'une exposition prolongée à une faible humidité.

4.3.6 Étalonnage et comparaison

Il convient de contrôler les enregistrements d'un hygrographe aussi fréquemment que possible. Quand les thermomètres mouillé et sec sont logés dans le même abri météorologique que l'Hygrographe, il est possible de comparer les deux instruments si les conditions sont suffisamment stables pour permettre l'opération. Dans d'autres cas, les comparaisons de terrain présentent un intérêt limité, car les temps de réponse des instruments comparés diffèrent.

Il n'est possible de procéder à un étalonnage exact qu'à l'aide d'une enceinte à atmosphère contrôlée et par comparaison à des instruments de référence.

Il est possible de vérifier le point correspondant à 100 % d'humidité relative. Il suffit pour cela d'entourer l'instrument d'un tissu saturé d'eau, l'opération devant se dérouler de préférence à l'intérieur d'un local à une température de l'air constante. (Toutefois, on ne pourra pas obtenir la valeur exacte si une masse importante de gouttelettes d'eau se forme sur les cheveux.)

L'humidité ambiante à l'intérieur d'un local peut permettre de vérifier une valeur de faible humidité relative par comparaison avec un psychromètre ventilé de référence. Il y a lieu d'exécuter une série de lectures.

Il est possible d'évaluer la constance à long terme et la justesse d'un instrument en établissant une fonction de corrélation à partir des comparaisons effectuées avec un psychromètre ventilé de référence.

4.3.7 Maintenance

Il convient d'encourager les observateurs à maintenir l'hygromètre en parfait état de propreté.

Les cheveux devraient être lavés fréquemment avec une brosse douce trempée dans de l'eau distillée, afin d'enlever la poussière ou les contaminants solubles qui s'y seraient accumulés. Il ne faut en aucun cas toucher les cheveux avec les doigts. Il convient de tenir propres les roulements du mécanisme et d'y appliquer occasionnellement un peu d'huile fine. Les surfaces de liaison de tout mécanisme de linéarisation contribuent pour une large part au frottement total de la tringlerie. Il est possible de réduire ce frottement en polissant ces surfaces avec du graphite, par exemple à l'aide de papier buvard frotté avec la mine d'un crayon noir.

Si l'entretien est bien fait, les cheveux peuvent durer plusieurs années sous un climat tempéré, à condition de ne pas être soumis à une pollution atmosphérique importante. En cas de remplacement des cheveux, il est nécessaire de procéder au réglage et au réétalonnage de l'instrument.

4.4 HYGROMÈTRE À POINT DE ROSÉE À MIROIR

4.4.1 Généralités

4.4.1.1 Théorie

L'hygromètre à point de rosée (ou à point de gelée), appelé encore hygromètre à miroir (refroidi) ou à condensation, est utilisé pour mesurer la température à laquelle l'air humide, quand il est refroidi, atteint son point de saturation et de la rosée (ou de la glace) se forme sur une surface solide, généralement un miroir, le dépôt pouvant normalement être détecté par un moyen optique. Le principe de mesure est décrit à la section 4.1.4.5 et ci-dessous.

La température thermodynamique du point de rosée est définie par rapport à une surface plane d'eau pure. Dans les réalisations pratiques, l'état d'équilibre est atteint pour des gouttelettes d'eau ayant une surface courbe. La tension de vapeur saturante au-dessus de ce type de surface est plus élevée que pour une surface plane (ce qui est connu comme l'effet Kelvin). Les impuretés hydrophobes tendent à exagérer l'effet en question, et inversement pour les impuretés hydrophiles, puisqu'elles tendent à faire baisser la tension de vapeur saturante (effet Raoult). L'effet Kelvin et l'effet Raoult (qui respectivement élève et abaisse le point de rosée apparent) sont réduits si la taille critique des gouttelettes est relativement grande, cela diminue directement l'effet de la courbure et réduit l'effet Raoult en abaissant la concentration des impuretés solubles.

4.4.1.2 Principes

Lorsque de l'air humide à la température T , à la pression p et ayant un rapport de mélange r_w (ou r_i) est refroidi, il finit par atteindre son point de saturation par rapport à une surface d'eau libre (ou à une surface de glace libre, à basse température). Ainsi, il peut se former de la rosée (ou de la gelée blanche) sur une surface solide non hygroscopique. La température correspondant à ce point de saturation est appelée température thermodynamique du point de rosée T_d (ou du point de gelée T_f). La tension de vapeur saturante correspondante par rapport à l'eau, e'_w , (ou à la glace e'_i) est fonction de T_d (ou T_f), comme l'indiquent les équations suivantes :

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = \frac{r \cdot p}{0.62198 + r} \quad (4.3)$$

$$e'_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = \frac{r \cdot p}{0.62198 + r} \quad (4.4)$$

L'hygromètre mesure T_d ou T_f . Malgré les grandes variations dynamiques de l'humidité dans la troposphère, il peut détecter des concentrations très élevées ou très faibles de vapeur d'eau à l'aide seulement d'un capteur de température.

On a utilisé des fluides ayant un point d'ébullition peu élevé pour refroidir le miroir, mais cette méthode est maintenant abandonnée en général, si ce n'est pour de très faibles concentrations de vapeur d'eau.

Compte tenu de ce qui précède, il faut pouvoir déterminer si le dépôt présent sur le miroir est formé d'eau surfondue ou de glace lorsque la température de la surface est égale ou inférieure à 0 °C.

L'hygromètre à miroir sert pour les mesures météorologiques ainsi qu'en tant qu'instrument de référence, tant sur le terrain qu'en laboratoire.

4.4.2 Description

4.4.2.1 Ensemble capteur

Les systèmes les plus courants sont équipés d'une petite surface réfléchissante de métal poli, refroidie par un dispositif électrique à effet Peltier. Le capteur est constitué d'un miroir métallique peu épais, de faible diamètre (2 à 5 mm), soumis à l'influence d'un dispositif de refroidissement (et éventuellement d'un dispositif de chauffage), ainsi que d'un capteur de température (un thermocouple ou un thermomètre à résistance en platine) accolé au dos du miroir. Le miroir doit avoir à la fois une grande conductibilité ther-

mique, une grande réflectivité optique et une grande résistance à la corrosion, ainsi qu'une faible perméabilité à la vapeur d'eau. Il peut être en or, en argent rhodié, en cuivre chromé ou en acier inoxydable.

Le miroir devrait être équipé d'un système (de préférence automatique) qui permette de déceler les impuretés qui peuvent élever ou abaisser le point de rosée apparent (voir section 4.4.2.2), afin que l'on puisse les éliminer.

4.4.2.2 Ensemble de détection optique

Un système électro-optique est ordinairement utilisé pour détecter la formation du condensat et fournir au système de servocommande l'information lui permettant de régler la température du miroir. Un étroit faisceau de lumière est dirigé vers le miroir à un angle d'incidence d'environ 55°. La lumière peut provenir d'une source incandescente, mais il s'agit le plus souvent à présent d'une diode électroluminescente. Dans les systèmes simples, en fonction de l'intensité de la lumière directement réfléchie qu'il capte, un détecteur optique agit sur l'ensemble refroidissement-chauffage par l'intermédiaire d'une servocommande. Plus le dépôt s'épaissit, plus le facteur de réflexion spéculaire diminue. Le miroir ne devrait pas être refroidi lorsque le dépôt est mince et que le facteur de réflexion diminue de 5 à 40 %. Des systèmes plus perfectionnés comprennent un détecteur optique auxiliaire qui capte la lumière dispersée par le dépôt ; ensemble, les deux détecteurs assurent une régulation très précise du refroidissement et du chauffage. Il est possible aussi d'utiliser un second miroir non refroidi pour améliorer le système de commande.

On obtient le maximum de précision en réglant la température du miroir pour qu'il n'y ait ni accumulation ni dissipation du condensat. Dans la pratique toutefois, le système de servocommande oscillera entre des valeurs proches de cette température. Le temps de réponse du miroir au chauffage et au refroidissement, facteur essentiel pour l'amplitude de ce phénomène d'oscillations appelé pompage, devrait se situer entre une et deux secondes. Le débit de l'air est aussi un facteur important pour le maintien d'un dépôt stable sur le miroir. On avance qu'il est possible de déterminer la température à laquelle se produit le phénomène de condensation à 0,05 K près.

On peut observer la formation des gouttelettes à l'aide d'un microscope et régler manuellement la température du miroir, mais cela demande beaucoup de temps et une compétence particulière.

4.4.2.3 Ensemble de commande thermique

Un dispositif à effet Peltier constitue une pompe à chaleur réversible simple, la polarité du courant

continu appliquée aux bornes du dispositif détermine si la jonction thermique absorbe de la chaleur pour refroidir le miroir ou si elle en dégage pour le chauffer. Il importe que soit maintenu un bon contact thermique entre le dispositif et le dos du miroir auquel il est collé. Pour le mesurage de températures du point de rosée très basses, il peut falloir utiliser un instrument équipé d'un dispositif à effet Peltier à plusieurs étages.

Un système électrique de servocommande règle la température en fonction du signal qu'il reçoit du sous-système constitué par le détecteur optique. Les systèmes modernes sont commandés par microprocesseur.

Il est possible d'utiliser un fluide ayant un point d'ébullition peu élevé, tel que l'azote liquide, pour refroidir le miroir, mais cette technique n'est plus beaucoup employée. Il est aussi possible d'utiliser un fil de résistance pour chauffer le miroir, mais compte tenu de la percée des dispositifs à effet Peltier de faible encombrement, ce système est maintenant abandonné.

4.4.2.4 Système d'affichage de la température

La température du point de rosée que l'instrument fournit à l'observateur n'est autre que la température du miroir, telle que la mesure le thermomètre électrique logé sous la surface du miroir. Les instruments disponibles dans le commerce comprennent normalement une interface électrique pour le thermomètre du miroir ainsi qu'un affichage numérique, mais ils peuvent aussi comporter des sorties électriques numériques ou analogiques servant à les raccorder à des systèmes d'enregistrement des données. Il est particulièrement utile de disposer d'un enregistrement sur diagramme pour surveiller les performances de l'instrument, notamment quand le signal continu provenant du thermomètre du miroir n'est pas fourni par l'affichage numérique, mais qu'il l'est par la sortie analogique.

4.4.2.5 Systèmes auxiliaires

L'instrument peut comprendre un microscope, ce qui permet d'établir visuellement si le miroir est recouvert de gouttelettes d'eau surfondues ou de cristaux de glace, lorsque la température du miroir est inférieure à 0 °C. Certains instruments sont munis d'un détecteur monté sur la surface du miroir pour que cette différence soit établie automatiquement (un capteur capacitif par exemple), tandis que d'autres appliquent une méthode fondée sur le facteur de réflexion.

Un système commandé par microprocesseur peut comprendre des algorithmes lui permettant de calculer et d'afficher l'humidité relative. Dans ce cas,

il importe que l'instrument puisse établir correctement la différence entre un dépôt d'eau surfondue et un dépôt de glace.

De nombreux instruments comprennent un moyen automatique permettant de diminuer les effets des impuretés. Il peut s'agir d'un cycle régulier de chauffage qui entraîne l'évaporation des impuretés volatiles, alors emportées par la circulation d'air. Il existe aussi des systèmes de nettoyage automatique du miroir par racleur.

Pour les mesures météorologiques, ainsi que dans la plupart des applications expérimentales, l'instrument doit être équipé d'une petite pompe chargée d'aspirer l'air à échantillonner au travers de l'enceinte de mesure. Il doit être équipé aussi d'un dispositif capable de régler le débit de l'air pour que le système de servocommande de la température du miroir fonctionne sans à-coups et que le temps de réponse aux variations de l'humidité soit satisfaisant. Le débit d'air optimal est fonction de l'humidité de l'air échantillonné et se situe normalement entre 0,25 et 1 L min⁻¹.

4.4.3 Méthode d'observation

Le bon fonctionnement de l'hygromètre à point de rosée dépendra de la capacité de l'instrument de maintenir un débit d'air approprié dans l'enceinte de mesure. Il est probable qu'il faille dans ce but modifier le réglage d'un régulateur, habituellement un dispositif d'étranglement logé en aval de l'enceinte de mesure, en fonction des variations diurnes de la température de l'air. Le réglage du débit d'air aura tendance à perturber le fonctionnement de l'hygromètre et il peut même être conseillé de lancer un cycle de chauffage. Les deux opérations devront se dérouler suffisamment longtemps avant que la lecture ait lieu pour que l'instrument soit stabilisé. L'intervalle de temps nécessaire dépendra du cycle opératoire de l'instrument utilisé. Pour connaître les réglages et détails appropriés, il faudra se reporter aux instructions fournies par le fabricant relativement au débit d'air et au cycle opératoire de l'instrument.

Il convient de vérifier fréquemment l'état du miroir et de le nettoyer au besoin, d'autant que la constance de l'instrument ne dépend pas nécessairement de l'état de propreté du miroir. Il convient de laver le miroir à l'eau distillée et de le sécher en l'essuyant précautionneusement à l'aide d'un chiffon doux ou d'un bâtonnet ouaté afin de retirer toute impureté soluble. Il faut prendre des précautions pour ne pas rayer la surface du miroir, tout particulièrement quand un fin revêtement de protection recouvre cette surface pour la protéger ou que le miroir com-

prend un détecteur eau-glace. Si l'air n'est pas filtré, il faut procéder au nettoyage chaque jour. Quand l'air est filtré, il convient de vérifier l'état du filtre à chaque observation. L'observateur doit faire attention de ne pas se tenir trop près de l'orifice d'aspiration et veiller à ce que rien ne vienne obstruer l'orifice d'évacuation de l'air.

Quand, au moment de la lecture, la température est égale ou inférieure à 0 °C, l'observateur doit déterminer si le miroir est recouvert d'eau surfondue ou de glace. Lorsque cette indication n'est pas fournie automatiquement par l'instrument, il doit alors examiner le miroir. Il y a lieu de s'assurer de temps à autre du bon fonctionnement de tout système automatique.

Les meilleurs instruments offrent une exactitude de ±0,3 K sur une vaste étendue de mesure du point de rosée (de -60 °C à +50 °C).

4.4.4 Installation et exposition

Les critères d'installation du capteur sont analogues à ceux qui s'appliquent à tout hygromètre ventilé. Ils sont moins stricts que dans le cas d'un psychromètre ou d'un capteur d'humidité relative, car les variations de la température de l'air ambiant, à condition que cette température demeure toujours supérieure au point de rosée, n'ont pas d'effet sur le point de rosée ou de gelée blanche d'un échantillon d'air. Il n'est donc pas nécessaire de placer le capteur dans un abri météorologique. Il convient de l'installer dans un endroit dégagé, sur un pied support par exemple, ceint d'une enveloppe protectrice, l'orifice d'aspiration étant situé à la hauteur voulue.

Il faut en outre prévoir un système d'échantillonnage de l'air. Il s'agit ordinairement d'une petite pompe destinée à aspirer l'air à la sortie de l'enceinte de mesure et à l'éjecter loin de l'orifice d'aspiration. Pour que la technique d'échantillonnage soit valable, il faut en effet éviter la recirculation de l'air. Dans des conditions stables de fonctionnement, la teneur en vapeur d'eau de l'air devrait être identique à l'entrée et à la sortie du système d'aspiration. Il est possible d'empêcher la recirculation de l'air en positionnant l'orifice d'évacuation plus haut que celui d'aspiration, cette technique pouvant ne pas être efficace cependant dans des conditions atmosphériques déterminées par le rayonnement, soit en présence d'un gradient thermique vertical négatif.

Il convient d'équiper d'un filtre à air les instruments qui fonctionnent en continu à l'extérieur. Ce filtre doit permettre la circulation de l'air et ne pas se colmater rapidement, puisqu'un colmatage risquerait d'entraîner une baisse importante de la pression et

de modifier ainsi la température de condensation dans l'enceinte de mesure. Le filtre en question peut être en métal fritté et capturer, les plus petites mises à part, l'ensemble des particules d'aérosols. Un filtre en métal présente l'avantage de pouvoir être chauffé facilement à l'aide d'un élément électrique, afin qu'il reste sec dans toutes les conditions. Il est en outre plus solide qu'une membrane filtrante et mieux indiqué pour les débits d'air relativement élevés que nécessite la méthode du miroir refroidi, à comparer à la méthode de sorption. Par contre, il risque d'être moins résistant que certaines membranes filtrantes à la corrosion causée par les polluants atmosphériques.

4.4.5 Étalonnage

Les performances d'un hygromètre à miroir servant aux observations sur le terrain pouvant se dégrader pour diverses raisons, il convient de procéder régulièrement à des comparaisons à l'aide d'un instrument de référence, tel un psychromètre d'Assmann ou un autre hygromètre à miroir. Lorsqu'un instrument fonctionne continuellement sur le terrain, il faudrait procéder à des mesures de contrôle hebdomadaires. Quand l'occasion se présente, il y a lieu de vérifier l'instrument, tant pour la mesure du point de rosée que pour celle du point de gelée blanche. Lorsque la température du miroir est inférieure à 0 °C, il faut examiner le dépôt pour voir s'il s'agit d'eau surfondue ou de glace.

Une vérification utile consiste à comparer la température du miroir à la température de l'air pendant que le système de régulation thermique de l'hygromètre ne fonctionne pas. La ventilation doit fonctionner et il convient de mesurer la température de l'air à l'orifice d'aspiration de l'hygromètre. Pour procéder à cette vérification, il faut s'assurer que les conditions sont stables et qu'il n'y aura pas de phénomène de condensation. Au besoin, il y a lieu de protéger du soleil le capteur et la conduite d'air et de les amener à un état d'équilibre thermique. Pour les besoins de la vérification, il est possible d'augmenter le débit de l'air aspiré.

Sur le terrain, on peut aussi procéder à l'étalonnage distinct de l'interface du thermomètre du miroir, et ce, par simulation du signal provenant du thermomètre. Dans le cas d'un thermomètre à résistance en platine, il est possible d'employer une boîte de résistance en platine standard ou une boîte de résistance à décades et d'un jeu de tables adapté. Il peut falloir aussi une interface spéciale de simulation se connectant au système de commande de l'hygromètre.

4.5 HYGROMÈTRE À CONDENSATION AU CHLORURE DE LITHIUM (CELLULE À POINT DE ROSÉE)

4.5.1 Généralités

4.5.1.1 Principes

Les principes physiques sur lesquels repose la méthode des solutions salines chauffées sont examinés à la section 4.1.4.5.2. La tension de vapeur d'équilibre à la surface d'une solution saturée de chlorure de lithium est exceptionnellement faible. Il en découle qu'une solution de chlorure de lithium est extrêmement hygroscopique dans des conditions normales d'humidité atmosphérique en surface. À condition que la tension de vapeur ambiante soit plus élevée que la tension de vapeur d'équilibre de la solution, il y aura condensation de la vapeur d'eau à la surface de la solution. À 0 °C, par exemple, la vapeur d'eau se condense sur la surface plane d'une solution saturée de chlorure de lithium jusqu'à ce que l'humidité relative n'atteigne plus que 15 %.

Il est possible de réaliser un dispositif à autorégulation thermodynamique en chauffant directement la solution par un courant électrique la traversant, provenant d'un appareil à tension constante. Il convient d'employer un courant alternatif afin d'éviter la polarisation de la solution. Lorsque la conductivité électrique de la solution diminue, le courant chauffant en fait de même, de sorte qu'un point d'équilibre est atteint avec une température constante est maintenue. En effet, si la solution refroidit, il y a alors condensation de la vapeur d'eau, la conductivité augmente et le courant chauffant également, ce qui inverse la tendance au refroidissement. Si la solution se réchauffe et dépasse le point d'équilibre, il y a alors évaporation de l'eau contenue dans la solution, ce qui entraîne une baisse de la conductivité et donc une diminution du courant chauffant de nouveau jusqu'au point où les pertes thermiques entraînent un refroidissement.

Compte tenu de ce qui précède, on peut déduire qu'il existe, pour la tension de vapeur ambiante, un seuil inférieur qu'il est possible de mesurer ainsi à une température quelconque. Au-dessous de cette valeur seuil, il faudrait refroidir la solution saline pour que la vapeur d'eau se condense, soit une méthode équivalente à celle du miroir refroidi, si ce n'est que la condensation se produit sur le miroir à une température inférieure, lorsqu'il y a saturation par rapport à une surface d'eau pure, c'est-à-dire au point de rosée ambiant.

La méthode reposant sur l'emploi du chlorure de lithium présente un certain degré d'incertitude,

puisque'il existe quatre hydrates différents de ce sel. À certaines températures critiques, deux de ces hydrates peuvent se trouver dans un état d'équilibre avec la phase aqueuse et la température d'équilibre obtenue en chauffant la solution varie en fonction de la transformation en hydrate qui s'ensuit. Dans les applications météorologiques, cette incertitude est la plus gênante lorsqu'elle intervient à des températures ambiantes du point de rosée inférieures à -12 °C. Pour un point de rosée ambiant de -23 °C, la différence éventuelle de température d'équilibre, selon laquelle des deux transformations de solution en hydrate se produisent, entraîne une incertitude de ±3,5 K dans la valeur du point de rosée obtenue.

4.5.1.2 Description

L'hygromètre dit cellule à point de rosée mesure la température à laquelle la tension de vapeur d'équilibre pour une solution saline saturée est égale à la tension de vapeur d'eau ambiante. Les équations empiriques de transformation, fondées sur les données relatives à la tension de vapeur saturante pour la solution de chlorure de lithium et pour l'eau pure, permettent de déduire la tension de vapeur d'eau et le point de rosée ambients par rapport à une surface plane d'eau pure. À une plage de températures du point de rosée allant de -12 °C à +25 °C correspond une plage de températures fournies par la cellule à point de rosée allant de +17 °C à +71 °C.

4.5.1.3 Capteurs à chauffage direct

Le capteur est formé d'un tube, ou bobine, dans lequel vient se loger dans une position axiale un thermomètre à résistance. La surface externe du tube est recouverte d'un tissu de verre (habituellement une bande à la fois enroulée autour du tube et disposée longitudinalement) imprégné d'une solution aqueuse de chlorure de lithium, parfois mélangé à du chlorure de potassium. Un double fil d'argent ou d'or est enroulé par-dessus le revêtement de la bobine, l'intervalle entre chaque tour étant identique. Une source de courant alternatif est connectée aux deux extrémités de l'enroulement bifilaire. Habituellement, le courant provient de l'alimentation secteur (50 ou 60 Hz). La conductivité électrique de la solution de chlorure de lithium est fonction de son degré de concentration. Le courant circule entre les deux fils adjacents de l'enroulement bifilaire, qui tiennent lieu d'électrodes, au travers de la solution. Par effet Joule, le courant chauffe la solution dont la température augmente.

Si ce n'est dans des conditions de très faible humidité, la tension de vapeur ambiante est supérieure à la tension de vapeur d'équilibre à la surface de la solution de chlorure de lithium, à la température de l'air ambiant, et la vapeur d'eau se condense à la surface de la solution. Quand la solution est chauffée

par le courant électrique, elle finit par atteindre une température au-dessus de laquelle la tension de vapeur d'équilibre est supérieure à la tension de vapeur ambiante ; c'est alors que la concentration de la solution commence à augmenter par évaporation.

Mis sous tension, l'instrument atteint normalement une température d'équilibre qui varie en fonction de la tension de vapeur d'eau ambiante. Au-dessus de cette température d'équilibre, la concentration de la solution augmente par évaporation, le courant électrique et l'effet Joule diminuent, la solution peut alors subir des pertes de chaleur et sa température s'abaisse. Au-dessous de la température d'équilibre, la concentration de la solution diminue par condensation, le courant électrique et l'effet Joule augmentent, ce qui provoque une élévation de la température de la solution. À la température d'équilibre, il ne se produit ni évaporation ni condensation, car la tension de vapeur d'équilibre et la tension de vapeur ambiante sont identiques.

Dans la pratique, la température d'équilibre mesurée varie en fonction des caractéristiques propres à chaque type de capteur et sa valeur tend à être plus élevée que celle prévue à partir des données sur la tension de vapeur d'équilibre pour une solution saturée de chlorure de lithium. Toutefois, on obtient une reproductibilité suffisamment bonne pour pouvoir utiliser la même fonction de transfert pour tous les capteurs réalisés à partir du même cahier des charges.

Une ventilation trop forte modifie les caractéristiques de transfert thermique propres au capteur dont le fonctionnement est en outre instable si la ventilation fluctue.

Afin de réduire les risques associés à une impulsion de courant excessive lorsque l'hygromètre est mis sous tension (la résistance de la solution à température ambiante étant relativement faible), un limiteur de courant, à savoir une petite ampoule, est normalement connecté en série avec l'élément chauffant. L'ampoule est choisie de façon que, compte tenu d'un courant normal de fonctionnement de la bobine, la résistance du filament soit suffisamment faible pour ne pas entraver le bon fonctionnement de l'hygromètre, le courant de fonctionnement de l'ampoule à incandescence (compte tenu notamment d'une bobine dont la résistance serait nulle) demeurant suffisamment faible pour ne pas risquer d'endommager l'élément chauffant.

La tension de vapeur d'équilibre d'une solution saturée de chlorure de lithium est fonction de l'hydrate en état d'équilibre avec la solution aqueuse.

Dans la plage des températures de la solution correspondant à une plage de points de rosée allant de -12 °C à +41 °C, il s'agit normalement du chlorure de lithium monohydraté. Au-dessous de -12 °C se forme le dihydrate, tandis qu'au-dessus de 41 °C, il s'agit du chlorure de lithium anhydre. Au voisinage des températures de transformation, l'hygromètre présente un fonctionnement instable et les lectures sont incertaines. Il est toutefois possible d'abaisser le seuil de -12 °C jusqu'à -30 °C en ajoutant à la solution une petite quantité de chlorure de potassium (KCl).

4.5.1.4 Capteurs à chauffage indirect

Il est possible d'améliorer l'exactitude du système décrit à la section 4.5.1.2 par un chauffage indirect de la solution de chlorure de lithium. La conductivité de la solution est mesurée entre deux électrodes en platine, ce qui commande une résistance chauffante.

4.5.2 Méthode d'observation

Une fois la température d'équilibre de la bobine lue, une fonction de transfert permet d'obtenir la température du point de rosée.

Il convient d'éviter de toucher le capteur, car toute variation thermique à la surface de la bobine entraîne une modification de la température d'équilibre.

L'instrument devrait être alimenté en permanence. En effet, lorsqu'on laisse sa température descendre au-dessous de la température d'équilibre, quelle que soit la durée du refroidissement, cela provoque une condensation et l'électrolyte s'écoule.

Il y a lieu d'exécuter à intervalles réguliers des mesures de contrôle à l'aide d'un hygromètre étalon de travail et, au besoin, de nettoyer l'instrument et d'opérer une nouvelle application de chlorure de lithium.

Si l'instrument fourni par le fabricant n'est pas équipé d'un limiteur de courant, il faudrait installer un tel système sans lequel le capteur risque d'être endommagé par une impulsion de courant trop importante pouvant survenir lorsque l'instrument est mis sous tension.

4.5.3 Installation et exposition

Il convient d'installer l'hygromètre dans un endroit dégagé sous une enveloppe le protégeant des effets du vent et de la pluie. L'instrument nécessite aussi un système capable de maintenir constante la vitesse de l'air aspiré.

La chaleur se dégageant de l'hygromètre peut altérer le fonctionnement d'autres instruments, ce dont il faut tenir compte pour choisir un emplacement.

Les polluants atmosphériques affectent le fonctionnement de l'hygromètre, en particulier les substances qui se dissocient en solution et entraînent donc une ionisation sensible.

4.5.4 Causes d'erreur

La mesure de la température d'équilibre nécessitant un thermomètre à résistance électrique, les causes d'erreur sont celles normalement associées à ce type d'instrument.

Les propriétés de la solution utilisée déterminent la température d'équilibre, mais la présence d'impuretés en quantité suffisante tend à modifier ces propriétés de façon imprévisible.

Les variations d'aspiration ont une influence sur les échanges thermiques et donc sur la constance de l'instrument. Pour que le fonctionnement soit stable, la vitesse de l'air aspiré doit être constante.

4.5.5 Étalonnage

Il convient de procéder chaque mois à un étalonnage sur le terrain, par comparaison avec un étalon de travail. Le thermomètre de la bobine et l'affichage de la température devraient être étalonnés régulièrement, comme c'est le cas pour les autres thermomètres et systèmes d'affichage utilisés en exploitation.

4.5.6 Maintenance

Il convient de renouveler régulièrement le chlorure de lithium. Cette opération pourra être effectuée une fois par mois, mais cela dépendra du niveau de la pollution atmosphérique. Elle consiste à laver la bobine à l'eau distillée, puis à y appliquer une nouvelle solution. Il y a lieu de nettoyer au même moment l'enveloppe protectrice de l'instrument.

Pour préparer une nouvelle solution, on pourra combiner du chlorure de lithium anhydre à de l'eau distillée dans une proportion en masse de 5 %, ce qui équivaut à 1 g de chlorure de lithium anhydre pour 20 ml d'eau.

Le capteur de température devrait être entretenu suivant les recommandations qui s'appliquent aux instruments électriques employés pour mesurer la température de l'air, mais il convient de faire cas de la différence dans l'étendue des températures mesurées.

4.6 HYGROMÈTRES À RÉSISTANCE OU CAPACITÉ ÉLECTRIQUE

4.6.1 Généralités

Les propriétés électriques de certains matériaux hygroscopiques varient en fonction de l'humidité relative ambiante, sans présenter une grande dépendance thermique.

On utilise de plus en plus les capteurs électriques d'humidité relative dans des applications exigeant une lecture à distance, en particulier lorsqu'il est nécessaire de disposer d'un affichage direct de l'humidité relative. Beaucoup de ces capteurs fournissant une réponse véritablement non linéaire aux variations d'humidité, les fabricants les équipent souvent de systèmes spéciaux de traitement et d'affichage des données.

4.6.2 Résistance électrique

Pour les besoins de la météorologie, il est ainsi possible d'employer des capteurs constitués de matière plastique traitée dont la couche superficielle conductrice est solidaire du substrat isolant. La résistivité de cette couche superficielle varie en fonction de l'humidité relative ambiante. Dans ce cas, le phénomène d'adsorption prédomine par rapport à l'absorption, puisque la partie sensible à l'humidité se limite à la couche superficielle. Ce type de capteur présente donc un temps de réponse court à une variation de l'humidité ambiante.

Cette catégorie de capteur comprend divers types d'instruments à électrolyte hygroscopique dans lequel la disponibilité en ions est fonction de la quantité de vapeur d'eau adsorbée. L'électrolyte peut se présenter sous différentes formes, notamment une solution liquide, un gel ou encore une résine échangeuse d'ions. Afin d'éviter la polarisation de l'électrolyte, on mesure la variation d'impédance pour un courant alternatif, de préférence à la résistance pour un courant continu. Comme il est possible d'utiliser un courant basse fréquence, les fils peuvent être relativement longs entre le capteur et l'interface électrique.

4.6.3 Capacité électrique

La méthode repose sur la variation des propriétés diélectriques d'un solide hygroscopique en fonction de l'humidité relative ambiante. Le plus souvent les capteurs de ce type sont formés de polymères. L'eau absorbée, dont les molécules ont un moment dipolaire important, modifie les propriétés diélectriques du polymère.

La partie sensible du capteur d'humidité est une feuille de polymère prise entre deux électrodes pour constituer un condensateur. L'impédance de ce condensa-

teur fournit une mesure de l'humidité relative. La valeur nominale de la capacité peut n'atteindre que quelques picofarads ou encore plusieurs centaines de picofarads, selon les dimensions des électrodes et l'épaisseur du diélectrique. À son tour, cette valeur a une influence sur la fréquence d'excitation, normalement de l'ordre d'au moins plusieurs kilohertz, utilisée pour mesurer l'impédance du dispositif. Cela exige des connexions courtes entre le capteur et l'interface électrique pour réduire l'effet des capacités parasites. Par conséquent, l'interface électrique fait normalement partie intégrante du capteur capacitif et il faut tenir compte de l'effet de la température ambiante sur les performances des composants du circuit ainsi constitué.

4.6.4 Méthode d'observation

Les capteurs dont le fonctionnement repose sur les variations des propriétés électriques de matériaux hygroscopiques sont souvent utilisés pour fournir une lecture à distance de l'humidité relative ainsi que dans les stations météorologiques automatiques.

4.6.5 Installation et exposition

Il convient d'installer ces capteurs dans des abris météorologiques. On doit se reporter aux instructions fournies par le fabricant pour monter le capteur proprement dit. Il faut obligatoirement utiliser des filtres protecteurs. Tout élément sensible à base d'électrolyte hygroscopique sera gravement endommagé s'il entre en contact direct avec de l'eau. Il faut donc prendre beaucoup de précautions pour que cela ne se produise pas.

4.6.6 Étalonnage

Les consignes d'étalonnage tant sur le terrain qu'en laboratoire correspondent à celles données pour les hygromètres à cheveux. Pour la plupart des capteurs de cette catégorie, il existe du matériel auxiliaire adapté permettant d'effectuer des contrôles à l'aide de solutions salines.

4.6.7 Maintenance

Il convient d'encourager les observateurs à maintenir l'hygromètre en parfait état de propreté. Il y a lieu aussi de se reporter à la section 4.1.4.11.

4.7 HYGROMÈTRES À ABSORPTION DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les molécules d'eau absorbent le rayonnement électromagnétique dans une gamme de bandes d'ondes

et à des longueurs d'onde spécifiques. Il est possible de tirer parti de cette propriété pour mesurer la concentration moléculaire de la vapeur d'eau dans un gaz. Les régions du spectre électromagnétique se prêtant le mieux à ce type d'application se situent dans l'ultraviolet et l'infrarouge. Aussi classe-t-on souvent ce type de techniques dans l'hygrométrie optique, ou, avec plus de justesse, dans l'hygrométrie d'absorption du rayonnement électromagnétique.

La méthode appliquée consiste à déterminer l'atténuation du rayonnement dans une bande d'ondes correspondant à la bande d'absorption de la vapeur d'eau, le long d'un trajet optique entre la source du rayonnement et un récepteur. Il existe principalement deux méthodes pour déterminer le degré d'atténuation du rayonnement.

- a) Transmission d'un rayonnement de bande étroite et d'intensité fixe à un récepteur étalonné. Habituellement, la source de rayonnement utilisée est l'hydrogène. Le spectre d'émission de l'hydrogène comprend la raie alpha de Lyman à 121,6 nm qui coïncide avec une bande d'absorption de la vapeur d'eau dans une région de l'ultraviolet où les autres gaz atmosphériques courants ne contribuent que faiblement à l'absorption. La trajectoire type permettant le mesurage de l'atténuation ne mesure que quelques centimètres de long.
- b) Transmission d'un rayonnement à deux longueurs d'onde, l'une caractérisée par une forte absorption par la vapeur d'eau et l'autre par une absorption soit nulle soit très faible. Lorsque le rayonnement émis aux deux longueurs d'onde provient d'une seule source, il est possible de connaître avec exactitude le rapport des intensités entre les deux longueurs d'onde, de sorte que l'atténuation du rayonnement émis à la longueur d'onde fortement absorbée peut être déterminée par la mesure du rapport en question au récepteur. Selon cette technique, le rayonnement provient le plus souvent d'une lampe à incandescence, des filtres permettant d'isoler deux longueurs d'onde dans l'infrarouge. La mesure nécessite une trajectoire normalement supérieure à un mètre de long.

Les deux types d'hygromètres à absorption du rayonnement électromagnétique nécessitent de fréquents étalonnages et conviennent mieux à la mesure de variations de la concentration de vapeur qu'à celles de valeurs absolues. L'application la plus répandue pour ce type d'hygromètre est la surveillance de variations d'humidité de fréquence très élevée, puisque, selon le principe de fonctionnement, il n'est pas nécessaire que le détecteur atteigne une tension

de vapeur d'équilibre avec l'échantillon. La constante de temps type d'un hygromètre optique n'est que de quelques millisecondes. Ce type d'hygromètres n'est pour le moment utilisé que dans le domaine de la recherche.

4.8 SÉCURITÉ

La mesure de l'humidité nécessite l'emploi de divers produits chimiques. Le personnel chargé de manipuler de tels produits devra toujours en connaître les propriétés. Il convient de conserver les produits dans des récipients appropriés, solides et bien étiquetés, placés dans un environnement adapté. Il y a lieu de respecter les consignes pouvant émaner des autorités locales quant à l'utilisation des matières toxiques.

Pour mesurer l'humidité, on se sert beaucoup de solutions salines saturées. Voici quelques conseils à suivre pour utiliser en toute sécurité certains sels d'usage courant.

- a) Le chlorure de baryum ($BaCl_2$) se présente sous la forme de cristaux incolores très solubles dans l'eau. Il est stable, mais il peut s'en dégager des fumées toxiques en cas d'incendie. Il ne réagit pas dangereusement avec l'eau, les acides, les bases, les oxydants ou les combustibles. En cas d'ingestion, il provoque nausées, vomissements, maux d'estomac et diarrhée. Il est dangereux d'en inhaller les poussières. Par contact, il irrite la peau et les yeux. Traiter en rinçant abondamment avec de l'eau ; en cas d'ingestion, consulter un médecin.
- b) Le chlorure de calcium ($CaCl_2$) se présente sous la forme de cristaux incolores, délicieux et très solubles dans l'eau. Sa dissolution dégage beaucoup de chaleur. Il amorce la polymérisation exothermique de l'éther méthylvinylique. Il peut entrer en réaction avec le zinc pour libérer de l'hydrogène. Il ne réagit pas dangereusement avec les acides, les bases, les oxydants ou les combustibles. Il irrite la peau, les yeux et le système respiratoire. Par ingestion, il provoque une irritation gastrique et, par ingestion massive, il peut causer une hypercalcémie, une déshydratation ou des lésions rénales. Traiter avec beaucoup d'eau et consulter un médecin.
- c) Le chlorure de lithium ($LiCl$) se présente sous la forme de cristaux incolores, stables quand maintenus au sec et très solubles dans l'eau. Il peut s'en dégager des fumées toxiques en cas d'incendie. Par ingestion, il peut modifier le bilan ionique du sang et provoquer l'anorexie, la diarrhée, des vomissements, des étourdisse-

- ments et des troubles du système nerveux central ; il peut aussi causer des lésions rénales lorsque la personne touchée suit un régime pauvre en sel (faire boire beaucoup d'eau et consulter un médecin). Il ne réagit pas dangereusement avec l'eau, les acides, les bases, les oxydants ou les combustibles.
- d) Le nitrate de magnésium ($Mg(NO_3)_2$) se présente sous la forme de cristaux incolores, délicieux et très solubles dans l'eau. Il peut enflammer les matières combustibles. La réaction avec des réducteurs peut être violente, et il peut se décomposer spontanément en diméthylformamide. Il peut s'en dégager des fumées toxiques en cas d'incendie (combattre l'incendie en pulvérisant de l'eau). Par ingestion massive, il peut être mortel (faire boire beaucoup d'eau et consulter un médecin). Par contact, il peut irriter la peau et les yeux (rincer avec de l'eau).
- e) Le nitrate de potassium (KNO_3) se présente sous la forme de cristaux blancs ou d'une poudre cristalline, très solubles dans l'eau. Il est stable, mais il peut s'en dégager des fumées toxiques en cas d'incendie (combattre l'incendie en pulvérisant de l'eau). Par ingestion massive, il

Tableau 4.4
Instruments étalons de mesure de l'humidité

Instrument étalon	Température du point de rosée		Humidité relative (%)	
	Étendue de mesure %	Incertitude (étalon secondaire) (K)	Étendue de mesure	Incertitude (étalon secondaire)
<i>Étalon primaire</i>				
Caractéristiques requises	de - 60 à - 15 de - 15 à 40	± 0,3 ± 0,1	de 5 à 100 de 5 à 100	± 0,2 ± 0,2
Hygromètre gravimétrique	de - 60 à - 35 de - 35 à 35 de 35 à 60	± 0,25 ± 0,03 ± 0,25		
Générateur d'humidité étalon à deux températures	de - 75 à - 15 de - 15 à 30 de 30 à 80	± 0,25 ± 0,1 ± 0,2		
Générateur d'humidité étalon à deux pressions	de - 75 à 30	± 0,2		
<i>Étalon secondaire</i>				
Caractéristiques requises	de - 80 à - 15 de - 15 à 40	± 0,75 ± 0,25	de 5 à 100	± 0,5
Hygromètre à miroir	de - 60 à 40	± 0,15		
Psychromètre de référence			de 5 à 100	± 0,6
<i>Étalon de référence</i>				
Caractéristiques requises	de - 80 à - 15 de - 15 à 40	± 1,0 ± 0,3	de 5 à 100	± 1,5
Psychromètre de référence			de 5 à 100	± 0,6
Hygromètre à miroir	de - 60 à 40	± 0,3		
<i>Étalon de travail</i>				
Caractéristiques requises	de - 15 à 40	± 0,5	de 5 à 100	± 2
Psychromètre d'Assmann	de - 10 à 25		de 40 à 90	± 1
Hygromètre à miroir	de - 10 à 30	± 0,5		

provoque des vomissements, mais il est rapidement éliminé par les urines (faire boire beaucoup d'eau). Par contact, il peut irriter les yeux (rincer avec de l'eau). Il ne réagit pas dangereusement avec l'eau, les acides, les bases, les oxydants ou les combustibles.

- f) Le chlorure de sodium (NaCl) se présente sous la forme de cristaux incolores ou d'une poudre blanche. Il est très soluble dans l'eau et stable. Il ne réagit pas dangereusement avec l'eau, les acides, les bases, les oxydants ou les combustibles. Par ingestion massive, il peut provoquer diarrhée, nausées, vomissements, hyperpnée et convulsions (dans les cas graves, consulter un médecin).

Des conseils pour utiliser le mercure en toute sécurité sont fournis au chapitre 3 de la Partie I, relatif à la mesure de la pression.

4.9 INSTRUMENTS ÉTALONS ET ÉTALONNAGE

4.9.1 Principes relatifs à l'étalonnage des hygromètres

La précision de l'étalonnage des capteurs d'humidité soulève des problèmes particuliers, principalement en raison de la quantité relativement faible de vapeur d'eau que peut contenir un échantillon d'air à des températures normales, mais aussi parce qu'il est généralement difficile d'isoler et de capter les gaz et plus précisément la vapeur d'eau. Un ordre hiérarchique commence tout juste à voir le jour dans la traçabilité des étalons d'humidité à l'échelle internationale.

L'hygrométrie gravimétrique permet d'établir un étalon absolu pour l'humidité, c'est-à-dire donner à l'humidité une définition quantitative physique. Le psychromètre de référence (compte tenu des limites de son étendue de mesure spécifiée) constitue aussi une forme d'étalon primaire, puisqu'il est possible d'en calculer les performances. L'étalonnage des étalons secondaires, de référence et de travail s'exécute en plusieurs étapes avec une incertitude croissante. Le tableau 4.4 fournit une vue globale sur les instruments étalons de mesure de l'humidité et leurs performances.

Dans la plupart des cas, on emploie de bons psychromètres ventilés et capteurs à point de rosée pour exécuter les étalonnages pratiques sur le terrain. On doit pouvoir raccorder ces étalons de types particuliers à des étalons des niveaux les plus élevés par des comparaisons conduites avec soin. Tout instrument servant d'étalon doit être étalonné lui-même pour tous les paramètres entrant dans le calcul de l'humidité (température de l'air, température du thermomètre mouillé, température du point de rosée, etc.). Il convient de contrôler aussi d'autres facteurs ayant une influence sur les performances d'un tel instrument, tel le débit d'air.

4.9.2 Fréquences et méthodes d'étalonnage

Tous les capteurs d'humidité utilisés sur le terrain nécessitent un étalonnage périodique. Pour ce qui est des psychromètres et des hygromètres chauffants à point de rosée ou à miroir, équipés d'un détecteur de température, l'étalonnage du détecteur pourra être contrôlé à chaque opération régulière de maintenance. Il faudrait en outre comparer l'instrument avec un étalon de travail, tel qu'un psychromètre d'Assmann, au moins une fois par mois.

Il y a tout intérêt à employer comme étalon de travail un psychromètre à aspiration de type standard, tel que celui d'Assmann. En effet, il est facile de vérifier l'intégrité de cet instrument par la comparaison des thermomètres sec et mouillé qui le composent et l'on peut en outre estimer que l'aspiration fonctionne bien lorsque le ventilateur produit un son normal. Il y a lieu d'étalonner l'instrument de référence à intervalles appropriés en fonction du type auquel il appartient.

Il est possible d'utiliser des solutions salines saturées pour vérifier les capteurs ne nécessitant qu'un échantillon de faible volume. La température ambiante devant demeurer constante au cours d'une telle vérification, il est difficile d'accorder foi à l'utilisation de ces solutions sur le terrain. Lorsqu'on utilise des solutions salines dans le but de contrôler un instrument, il faut se rappeler que la valeur nominale d'humidité donnée pour la solution saline n'est raccordée à aucun étalon primaire.

4.9.3 Étalonnage en laboratoire

L'étalonnage en laboratoire est essentiel au maintien de l'exactitude :

- Instruments étalons de travail et de terrain : l'étalonnage en laboratoire des instruments étalons de travail et de terrain devrait avoir lieu aussi régulièrement que celui d'autres thermomètres d'exploitation. Pour ce faire, il est possible de traiter le dispositif du capteur à miroir refroidi distinctement de l'unité de commande et d'étalonner séparément le thermomètre du miroir. L'unité de commande devrait être étalonnée suivant la même fréquence que tout autre matériel électronique de précision. Ainsi n'est-il pas absolument nécessaire d'étalonner un instrument de terrain à l'aide d'un générat-

teur d'humidité lorsque ces composants ont été étalonnés séparément comme cela vient d'être décrit.

Il est possible de contrôler le bon fonctionnement d'un instrument dans des conditions stabilisées à l'intérieur d'un local par comparaison avec un instrument de référence, tel qu'un psychromètre d'Assmann ou un hygromètre étalon à miroir. Lorsque l'instrument de terrain comprend un détecteur de glace, il convient de contrôler aussi le bon fonctionnement de ce système.

- b) Instruments étalons et instruments de référence : l'étalonnage des instruments étalons et des instruments de référence nécessite un générateur d'humidité de précision, ainsi qu'un hygromètre étalon de transfert adapté. Les générateurs d'humidité à deux pressions et à deux températures fournissent un débit d'air contrôlé à une température et à un point de rosée prédéterminés. Il y a lieu de procéder au moins une fois par an à un étalonnage pour toute l'étendue de mesure correspondant à l'application de référence de l'instrument. Il faudrait étalonner séparément, au moins une fois par an, le thermomètre du miroir et le système d'affichage de la température.

4.9.4 Étalons primaires

4.9.4.1 Hygrométrie gravimétrique

La méthode gravimétrique offre une mesure absolue de la teneur en vapeur d'eau d'un échantillon d'air dont elle fournit le rapport de mélange. Il s'agit tout d'abord d'extraire la vapeur d'eau contenue dans l'échantillon à l'aide d'un déshydratant dont la masse est connue, notamment l'anhydride phosphorique (P_2O_5) ou le perchlorate de magnésium ($Mg(C10_4)_2$). Le déshydratant est pesé avant, puis après l'opération et la différence permet d'établir la masse de la vapeur d'eau. On détermine la masse de l'échantillon sec soit en pesant celui-ci (après liquéfaction afin qu'il soit plus aisé de manipuler le volume de l'échantillon) soit en mesurant son volume (connaissant sa masse volumique).

La méthode décrite nécessite un appareil d'une telle complexité pour atteindre l'exactitude requise que son application se limite au laboratoire. Pour atteindre une exactitude suffisante dans les mesures, il faut en outre examiner un échantillon d'air d'un volume considérable. Aussi, en utilisation pratique, faut-il que l'air circule dans l'appareil à débit constant pendant un certain nombre d'heures, qui variera en fonction de l'humidité de l'air, afin que la masse de la vapeur d'eau extraite de l'échantillon soit suffisante pour permettre une pesée exacte. En

conséquence, la méthode est uniquement employée pour fournir un étalon absolu servant de référence et l'on trouvera l'appareil principalement dans les laboratoires d'étalonnage nationaux.

4.9.4.2 Générateur dynamique d'humidité étalon à deux pressions

Cet appareil de laboratoire sert de source de gaz dont l'humidité absolue est déterminée. Le gaz vecteur traverse une enceinte de saturation à la pression P_1 , puis passe dans une autre enceinte dans laquelle il se produit une détente isotherme à une pression basse P_2 . Les deux enceintes sont maintenues à la même température par un bain d'huile. Selon la loi de Dalton sur les pressions partielles, l'humidité relative du mélange gaz-vapeur d'eau est directement liée à la pression totale dans chacune des deux enceintes. En effet, la même relation existe entre, d'une part, la tension partielle e' de la vapeur dans l'enceinte à basse pression et la tension de vapeur saturante e'_w et, d'autre part, la pression totale dans le saturateur à haute pression et la pression totale dans l'enceinte à basse pression. L'humidité relative U_w est donc fournie par l'équation suivante :

$$U_w = 100 \cdot e'/e'_w = 100 \cdot P_1/P_2 \quad (4.5)$$

La relation s'applique aussi à la phase solide, à savoir lorsque le gaz est saturé par rapport à la glace à la pression P_1 :

$$U_i = 100 \cdot e'/e'_i = 100 \cdot P_1/P_2 \quad (4.6)$$

4.9.4.3 Générateur dynamique d'humidité étalon à deux températures

Cet appareil de laboratoire fournit, à une température T_1 , un flux de gaz humide ayant une température de point de rosée ou de point de gelée blanche T_2 . Il comprend deux bains à température contrôlée, équipés chacun d'échangeurs thermiques et, dans l'un, d'un saturateur contenant soit de l'eau soit de la glace. L'air circulant sur ces bains est d'abord saturé à la température T_1 , puis il subit un réchauffement isobare à la température T_2 . Dans les appareils conçus pour un usage pratique, la saturation est obtenue par une circulation continue de l'air. Dans les instruments de contrôle, l'air est aspiré à la température T_2 et à un faible débit par rapport à la circulation principale.

4.9.5 Étalons secondaires

Il convient d'entretenir avec soin un instrument étalon secondaire. Il ne sera retiré du laboratoire que pour être étalonné par rapport à un étalon primaire ou pour les besoins d'une comparaison entre étalons secondaires. Les étalons secondaires peuvent servir d'étalons de transfert à partir d'étalons primaires.

Il est possible d'utiliser un hygromètre à miroir comme instrument étalon secondaire dans des conditions contrôlées de température, d'humidité et de pression. Dans ce cas, l'hygromètre en question aura été étalonné par un laboratoire accrédité, et l'on disposera des limites d'incertitude associées à cet instrument, pour l'ensemble de son étendue de mesure utile. Il faudra en outre pouvoir relier directement l'étalonnage à un étalon primaire. L'étalonnage sera renouvelé à intervalles réguliers appropriés (en général une fois par an).

Les caractéristiques générales des hygromètres à miroir sont examinées à la section 4.4. Ce type d'instrument met en pratique une technique fondamentale pour déterminer l'humidité de l'air. À condition que les consignes d'entretien et d'utilisation fournies par le fabricant soient bien respectées, l'instrument donne une mesure primaire du point de rosée ou du point de gelée blanche dans des limites d'incertitude fonction de la concordance entre la température superficielle du miroir au point approprié du cycle de condensation-évaporation et la température enregistrée par le thermomètre du miroir au moment de l'observation. Il faut en outre tenir compte des effets Kelvin et Raoult sur la température de condensation ainsi que de toute variation de la pression de l'air causée par la technique d'échantillonnage, et ce, en utilisant les équations indiquées à la section 4.4.1.2.

4.9.6 Étalons de travail (et instruments de référence pour le terrain)

Il est possible d'utiliser un hygromètre à miroir ou un psychromètre d'Assmann comme étalon de travail pour exécuter des comparaisons dans les conditions ambiantes sur le terrain ou en laboratoire. Il faudra pour cela avoir effectué des comparaisons au moins au niveau de l'étalon de référence. Les comparaisons devraient avoir lieu au moins une fois par an dans des conditions stabilisées, à l'intérieur d'un local. L'étalon de travail nécessite pour échantillonner l'air un dispositif d'aspiration adapté.

4.9.7 Psychromètre de référence de l'OMM

Étant donné que ses performances sont calculables, cet instrument est essentiellement un étalon primaire. Il sert principalement toutefois d'instrument de référence de grande précision, en particulier pour les essais d'homologation d'autres types d'instruments sur le terrain. Il est conçu comme un instrument autonome, à utiliser près d'un abri ou d'un autre instrument de terrain. Il est réalisé suivant des spécifications précises. Il exige des opérateurs compétents, ayant l'expérience des travaux de précision en laboratoire. Ceux-ci devraient porter une attention particulière à l'aspiration et prendre toutes les pré-

cautions pour ne pas contaminer le thermomètre mouillé par contact avec les doigts ou tout autre objet. Il existe toutefois des tests simples qui permettent de valider les lectures à tout moment et qu'il convient donc d'employer fréquemment en cours d'utilisation. Wylie et Lalas (Note technique N° 194 de l'OMM) décrivent cet instrument et en fournissent les consignes d'utilisation.

4.9.8 Solutions salines saturées

Pour les besoins de l'étalonnage des capteurs d'humidité relative, il est possible d'utiliser des récipients contenant des solutions saturées des sels appropriés. Voici la liste des sels utilisés habituellement ainsi que leur humidité relative à saturation, à 25 °C :

Chlorure de baryum	$(BaCl_2)$:	90,3 %
Chlorure de sodium	$(NaCl)$:	75,3 %
Nitrate de magnésium	$(Mg(NO_3)_2)$:	52,9 %
Chlorure de calcium	$(CaCl_2)$:	29,0 %
Chlorure de lithium	$(LiCl)$:	11,1 %

Il importe que la solution présente une surface importante à comparer à celle de l'élément sensible et au volume d'air échantillonné pour que l'état d'équilibre soit rapidement atteint. Un orifice d'accès hermétiquement clos doit en outre être prévu pour le capteur de contrôle. Il convient de mesurer la température du récipient et de la maintenir constante, car, pour la plupart des sels, le degré d'humidité à saturation est affecté d'un coefficient thermique non négligeable.

L'emploi des solutions salines saturées exige certaines précautions. Le personnel chargé de manipuler de tels produits chimiques doit en connaître la toxicité et le caractère corrosif. Il est possible d'utiliser les sels dont la liste figure ci-dessus en toute sécurité, en évitant contact avec la peau, ingestion et projection dans les yeux. Il faudrait toujours conserver ces sels dans des récipients solides et bien étiquetés, sur lesquels seront indiqués clairement tous les dangers qu'ils présentent. Il convient de prendre des précautions pour dissoudre des cristaux de chlorure de sodium dans l'eau, car cela provoque un dégagement important de chaleur. Les dangers que présentent ces produits chimiques sont examinés plus en détail à la section 4.8.

Certes l'emploi des solutions salines saturées constitue une méthode simple pour régler certains capteurs d'humidité (relative), mais un tel réglage n'équivaut pas à l'étalonnage de ces capteurs, puisqu'il n'établit pas de relation avec des étalons reconnus. À l'heure actuelle, il n'est établi en général aucune traçabilité des valeurs (nominales) des solutions salines par rapport à des étalons de référence. Après le réglage d'un capteur suivant la méthode des solutions salines saturées, il faudrait toujours contrôler les mesures que fournit ce capteur à l'aide d'un étalon de référence.

ANNEXE 4.A

DÉFINITIONS ET SPÉCIFICATIONS DE LA VAPEUR D'EAU DANS L'ATMOSPHÈRE

(d'après le *Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume I, appendice B)

1) *Le rapport de mélange r* de l'air humide est le rapport de la masse m_v de vapeur d'eau à la masse m_a de l'air sec avec laquelle la vapeur d'eau est associée :

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (4.A.1)$$

2) *L'humidité spécifique, la concentration de masse ou le contenu en vapeur d'eau q* de l'air humide est le rapport de la masse m_v de vapeur d'eau à la masse $m_v + m_a$ de l'air humide dans laquelle la masse de vapeur d'eau m_v est contenue :

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} \quad (4.A.2)$$

3) *Concentration de la vapeur (masse volumique de la vapeur d'eau dans un mélange) ou humidité absolue* : Dans un mélange de vapeur d'eau et d'air sec, la concentration de vapeur d'eau ρ_v est définie comme étant le rapport de la masse de vapeur m_v au volume V occupé par le mélange :

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} \quad (4.A.3)$$

4) *Titre molaire de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide* : Le titre molaire x_v de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide, constitué d'une masse m_a d'air sec et d'une masse m_v de vapeur d'eau, est défini par le rapport du nombre de moles de vapeur d'eau ($n_v = m_v/M_v$) au nombre total de moles de l'échantillon $n_v + n_a$ où n_a désigne le nombre de moles d'air sec ($n_a = m_a/M_a$) de l'échantillon envisagé. On a donc :

$$x_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} \quad (4.A.4)$$

ou encore :

$$x_v = \frac{r}{0.62198 + r} \quad (4.A.5)$$

où r n'est autre que le rapport de mélange ($r = m_v/m_a$) de la vapeur d'eau de l'échantillon d'air humide.

5) *La tension de vapeur e'* de la vapeur d'eau dans l'air humide à une pression totale p et avec un rapport de mélange r est définie par :

$$e' = \frac{r}{0.62198 + r} p = x_v \cdot p \quad (4.A.6)$$

6) *Saturation* : À une température et une pression données, l'air humide est dit saturé si son rapport de mélange est tel que l'air humide puisse coexister en équilibre indifférent avec une phase condensée associée (liquide ou solide) à la même température et à la même pression, la surface de contact des phases étant plane.

7) *Rapport de mélange de saturation* : Le symbole r_w désigne le rapport de mélange de saturation de l'air humide par rapport à une surface plane de la phase liquide associée. Le symbole r_i désigne le rapport de mélange de saturation de l'air humide par rapport à une surface plane de la phase solide associée. Les phases liquide et solide associées en question consistent respectivement en eau presque pure et en glace presque pure, un peu d'air dissous étant présent dans l'une et l'autre.

8) *Tension de vapeur saturante dans la phase pure* : La tension de vapeur saturante e_w de la vapeur d'eau pure par rapport à l'eau liquide est la pression de la vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau pure à la même température et à la même pression, de même pour e_i par rapport à la glace. e_w et e_i sont des fonctions de la température seule, c'est-à-dire :

$$e_w = e_w(T) \quad (4.A.7)$$

$$e_i = e_i(T) \quad (4.A.8)$$

9) *Titre molaire de la vapeur d'eau dans l'air humide saturé par rapport à l'eau* : Le titre molaire de la vapeur d'eau dans l'air humide saturé par rapport à l'eau, à la pression p et à la température T , est le titre molaire x_{wv} de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide, à la même pression p et à la même

température T , en équilibre stable en présence d'une surface plane d'eau contenant la quantité d'air dissous correspondant à l'équilibre. On désignera de même par x_{vi} le titre molaire saturant par rapport à une surface plane de glace contenant la quantité d'air dissous correspondant à l'équilibre.

10) **Tension de vapeur saturante de l'air humide :** La tension de vapeur saturante relativement à l'eau liquide e'_w de l'air humide à une pression p et à une température T est définie par :

$$e'_w = \frac{r_w}{0.621\,98 + r_w} p = x_{vw} \cdot p \quad (4.A.9)$$

De même, la tension de vapeur saturante relativement à la glace e'_i de l'air humide à une pression p et à une température T est définie par :

$$e'_i = \frac{r_i}{0.621\,98 + r_i} p = x_{vi} \cdot p \quad (4.A.10)$$

11) **Relations entre la tension de vapeur saturante de la phase pure et celle de l'air humide :** Dans les limites météorologiques de la pression et de la température, les relations suivantes sont valables à 0,5 % près ou moins :

$$e'_w = e_w \quad (4.A.11)$$

$$e'_i = e_i \quad (4.A.12)$$

12) **La température thermodynamique du point de rosée T_d** de l'air humide à la pression p et avec le rapport de mélange r est la température à laquelle l'air humide, saturé par rapport à l'eau à la pression donnée, a un rapport de mélange de saturation r_w égal au rapport de mélange r donné.

13) **La température thermodynamique du point de gelée blanche T_f** de l'air humide à la pression p et avec le rapport de mélange r est la température à laquelle l'air humide, saturé par rapport à la glace à la pression donnée, a un rapport de mélange de saturation r_f égal au rapport de mélange r donné.

14) **Les températures du point de rosée et du point de gelée blanche** ainsi définies sont liées au rapport de mélange r et à la pression totale p par les équations suivantes :

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0.621\,98 + r} \quad (4.A.13)$$

$$e_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0.621\,98 + r} \quad (4.A.14)$$

15)⁵ **L'humidité relative U_w de l'air humide par rapport à l'eau,** à la pression p et à la température T , est le rapport, exprimé en pourcentage, entre le titre molaire de la vapeur d'eau x_v et le titre molaire de la vapeur d'eau x_{vw} , que l'air aurait s'il était saturé par rapport à l'eau, à la même pression p et à la même température T . De sorte que :

$$\begin{aligned} U_w &= 100 \left(\frac{x_v}{x_{vw}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{px_v}{px_{vw}} \right)_{p,T} \\ &= 100 \left(\frac{e'}{e'_w} \right)_{p,T} \end{aligned} \quad (4.A.15)$$

où les indices p,T indiquent que chaque terme est soumis à des conditions identiques de pression et de température. La dernière expression est analogue dans sa forme à la définition classique fondée sur la loi de Dalton sur les pressions partielles.

U_w est aussi lié au rapport de mélange r par l'expression :

$$U_w = 100 \frac{r}{r_w} \cdot \frac{0.621\,98 + r_w}{0.621\,98 + r} \quad (4.A.16)$$

où r_w est le rapport de mélange de saturation, à la pression et à la température de l'air humide.

16)⁵ **L'humidité relative U_i de l'air humide par rapport à la glace,** à la pression p et à la température T , est le rapport, exprimé en pourcentage, entre le titre molaire de la vapeur d'eau x_v et le titre molaire de la vapeur d'eau x_{vi} que l'air aurait s'il était saturé par rapport à la glace, à la même pression p et à la même température T . Ce qui donne par analogie avec les définitions figurant au paragraphe 15 :

$$U_i = 100 \left(\frac{x_v}{x_{vi}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{px_v}{px_{vi}} \right)_{p,T} = \left(\frac{e'}{e'_i} \right)_{p,T} \quad (4.A.17)$$

17) **L'humidité relative aux températures inférieures à 0 °C** doit être calculée relativement à l'eau liquide. Les avantages de cette manière de procéder sont les suivants :

- La plupart des hygromètres, essentiellement sensibles à l'humidité relative, indiquent l'humidité relative par rapport à l'eau à toute température ;

⁵ Les équations 4.A.15 et 4.A.17 ne s'appliquent pas à l'air humide lorsque la pression p est inférieure à la tension de vapeur saturante de l'eau pure et de la glace respectivement à la température T .

- b) La majorité des nuages à des températures inférieures à 0 °C se compose entièrement ou presque entièrement d'eau liquide ;
- c) Les humidités relatives supérieures à 100 % ne seraient en général pas observées. Ceci est particulièrement important dans les messages synoptiques, étant donné que l'atmosphère est souvent sursaturée relativement à la glace à des températures inférieures à 0 °C ;
- d) La majorité des renseignements dont on dispose actuellement sur l'humidité relative à des températures au-dessous de 0 °C est exprimée sur la base de saturation relativement à l'eau liquide.

18) **La température thermodynamique du thermomètre mouillé de l'air humide**, à la pression p , à la température T et ayant le rapport de mélange r , est la température T_w qui est celle de l'air humide après avoir été porté adiabatiquement à saturation, à la pression p , par suite de l'évaporation dans l'air humide de l'eau liquide à la pression p et à la température T_w contenant la quantité d'air dissous correspondant à l'équilibre par rapport à l'air saturé à la même pression et à la même température. La température T_w est définie par l'équation :

$$\begin{aligned} h(p, T, r) + [r_w(p, T_w) - r] h_w(p, T_w) & \quad (4.A.18) \\ = h(p, T_w, r_w(p, T_w)) \end{aligned}$$

où $r_w(p, T_w)$ est le rapport de mélange de l'air saturé à la pression p et à la température T_w ; $h_w(p, T_w)$ est l'enthalpie de 1 gramme d'eau pure à la pression p et à la température T_w ; $h(p, T_r)$ est l'enthalpie⁶ de $1 + r$ grammes d'air humide, composé de 1 gramme d'air sec et de r grammes de vapeur d'eau, à la pression p et à la température T ; $h(p, T_w, r_w(p, T_w))$ est l'enthalpie de $1 + r_w$ grammes d'air saturé, composé de 1 gramme d'air sec et de r_w grammes de vapeur d'eau saturante à la pression p et à la température T_w . (C'est une fonction de p et T_w seulement qui peut donc être représentée par $h_{sw}(p, T_w)$).

Si l'air sec et la vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits dont les chaleurs massiques sont constantes, cette équation devient :

$$T - T_w = \frac{[r_w(p, T_w) - r] L_v(T_w)}{c_{pa} + r c_{pv}} \quad (4.A.19)$$

⁶ L'enthalpie d'un système en équilibre, à la pression p et à la température T , est exprimée par $E + pV$, où E est l'énergie interne du système et V , son volume. La somme des enthalpies des phases d'un système fermé est conservée dans les processus isobares adiabatiques.

où $L_v(T_w)$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température T_w ; c_{pa} est la chaleur massique à pression constante de l'air sec; c_{pv} est la chaleur massique à pression constante de la vapeur d'eau.

- Note : Les techniciens de la climatisation (conditionnement d'air) ont appelé durant un certain temps la température thermodynamique du thermomètre mouillé, telle qu'elle est définie ici, « température de saturation adiabatique ».

19) **La température thermodynamique du thermomètre recouvert de glace** de l'air humide à la pression p , à la température T et ayant le rapport de mélange r , est la température T_i à laquelle la glace pure, à la pression p , doit être évaporée dans cet air, adiabatiquement et à la pression p , jusqu'à la saturation à la température T_i . Il s'agit de saturation par rapport à la glace. La température T_i est définie par l'équation :

$$\begin{aligned} h(p, T, r) + [r_i(p, T_i) - r] h_i(p, T_i) & \quad (4.A.20) \\ = h(p, T_i, r_i(p, T_i)) \end{aligned}$$

où $r_i(p, T_i)$ est le rapport de mélange de l'air saturé à la pression p et à la température T_i ; $h_i(p, T_i)$ est l'enthalpie de 1 gramme d'eau pure à la pression p et à la température T_i ; $h(p, T, r)$ est l'enthalpie de $1 + r$ grammes d'air humide, composé de 1 gramme d'air sec et de r grammes de vapeur d'eau, à la pression p et à la température T ; $h(p, T_i, r_i(p, T_i))$ est l'enthalpie de $1 + r_i$ grammes d'air saturé, composé de 1 gramme d'air sec et de r_i grammes de vapeur d'eau saturante à la pression p et à la température T_i . (C'est une fonction de p et T_i seulement qui peut donc être représentée par $h_{si}(p, T_i)$).

Si l'air sec et la vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits dont les chaleurs massiques sont constantes, cette équation devient :

$$T - T_i = \frac{[r_i(p, T_i) - r] L_s(T_i)}{c_p + r c_{pv}} \quad (4.A.21)$$

où $L_s(T_i)$ est la chaleur latente de sublimation de l'eau à la température T_i .

La relation entre T_w ou T_i , ainsi définie, et la température du thermomètre mouillé ou du thermomètre recouvert de glace indiquée par un psychromètre donné doivent être établies par expérimentation soigneusement contrôlée en tenant compte des différentes variables entrant en jeu comme, par exemple, la ventilation, les dimensions du réservoir du thermomètre et le rayonnement.

ANNEXE 4.B

FORMULES À UTILISER POUR LE CALCUL DE L'HUMIDITÉ

(Voir aussi la section 4.1.2)

Tension de vapeur saturante :

$$e_w(t) = 6.112 \exp [17.62 t / (243.12 + t)]$$

Eau (de -45 à 60 °C) (phase pure)

$$e'_w(p,t) = f(p) \cdot e_w(t)$$

Air humide

$$e_i(t) = 6.112 \exp [22.46 t / (272.62 + t)]$$

Glace (de -65 à 0 °C) (phase pure)

$$e'_i(p,t) = f(p) \cdot e_i(t)$$

Air humide

$$f(p) = 1.0016 + 3.15 \cdot 10^{-6} p - 0.074 p^{-1}$$

[voir la note ci-dessous]

Point de rosée et point de gelée blanche :

$$t_d = \frac{243.12 \cdot \ln[e' / 6.112 f(p)]}{17.62 - \ln[e' / 6.112 f(p)]}$$

Eau (de -45 à 60 °C)

$$t_f = \frac{272.62 \cdot \ln[e' / 6.112 f(p)]}{22.46 - \ln[e' / 6.112 f(p)]}$$

Glace (de -65 à 0 °C)

Formules psychrométriques à utiliser avec le psychromètre d'Assmann :

$$e' = e'_w(p, t_w) - 6.53 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0.000\,944 t_w) \cdot p \cdot (t - t_w) \quad \text{Eau}$$

$$e' = e'_i(p, t_i) - 5.75 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot (t - t_i) \quad \text{Glace}$$

Humidité relative :

$$U = 100 e'/e'_w(p,t) \%$$

$$U = 100 e'_w(p, t_d)/e'_w(p, t) \%$$

Symboles utilisés :

t = température de l'air (température du thermomètre sec) ;

t_w = température du thermomètre mouillé ;

t_i = température du thermomètre recouvert de glace ;

t_d = température de rosée ;

t_f = température du point de gelée ;

p = pression de l'air humide ;

$e_w(t)$ = tension de vapeur saturante dans la phase pure par rapport à l'eau à la température du thermomètre sec ;

$e_w(t_w)$ = tension de vapeur saturante dans la phase pure par rapport à l'eau à la température du thermomètre mouillé ;

$e_i(t)$ = tension de vapeur saturante dans la phase pure par rapport à la glace à la température du thermomètre sec ;

$e_i(t_i)$ = tension de vapeur saturante dans la phase pure par rapport à la glace à la température du thermomètre recouvert de glace ;

$e'_w(t)$ = tension de vapeur saturante de l'air humide par rapport à l'eau à la température du thermomètre sec ;

$e'_w(t_w)$ = tension de vapeur saturante de l'air humide par rapport à l'eau à la température du thermomètre mouillé ;

- $e'_i(t)$ = tension de vapeur saturante de l'air humide par rapport à la glace à la température du thermomètre sec ;
 $e'_i(t_i)$ = tension de vapeur saturante de l'air humide par rapport à la glace à la température du thermomètre recouvert de glace ;
 U = humidité relative.

• Note : f est en réalité une fonction à la fois de la pression et de la température, soit $f=f(p, t)$, comme l'explique S. Letestu dans l'introduction de la table 4.10 (OMM-N° 188). Dans la pratique cependant, l'effet de la température ($\pm 0,1\%$) est bien inférieur à celui de la pression (entre 0 et $+0,6\%$). C'est pourquoi il est admis d'omettre la température dans la formule en question (voir aussi le chapitre 10 de la publication OMM/TD-N° 289). Cette formule ne devrait toutefois s'appliquer qu'à une pression d'environ 1 000 hPa (c'est-à-dire aux mesures en surface) et non pas aux mesures en altitude pour lesquelles il convient d'utiliser la table 4.10 (OMM-N° 188).

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Bindon, H. H., 1965 : A critical review of tables and charts used in psychrometry. Dans : *Humidity and Moisture* (publié sous la direction de Wexler, A.), Volume 1, pp. 3 à 15, Reinhold, New York,.
- Organisation météorologique mondiale, 1966 : *Tables météorologiques internationales* par S. Letestu, OMM-N° 188. TP.94, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : *Règlement technique*, Volume 1, OMM-N° 49, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989a : *WMO Assmann Psychrometer Intercomparison* (D. Sonntag). Rapport N° 34 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et méthodes d'observation, OMM/TD-N° 289, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989b : *WMO International Hygrometer Intercomparison* (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe et K. Smedstud). Rapport N° 38 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et méthodes d'observation, OMM/TD-N° 316, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Measurements of Temperature and Humidity* (R. G. Wylie et T. Lalas). Note technique N° 194, OMM-N° 759, Genève.
- Sonntag, D., 1990 : Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae. *Zeitschrift für Meteorologie*, Volume 40, Numéro 5, pp. 340 à 344.
- Sonntag, D., 1994 : Advancements in the field of hygrometry. *Zeitschrift für Meteorologie*, Volume 3, Numéro 2, pp. 51 à 66.
- Wexler, A. (ed.), 1965 : *Humidity and Moisture*. Volumes 1 et 3, Reinhold, New York.

CHAPITRE 5

MESURE DU VENT EN SURFACE

5.1 GÉNÉRALITÉS

5.1.1 Définition

Les définitions suivantes sont utilisées dans ce chapitre (voir Mazzarella, 1972 pour plus de détails).

La vitesse du vent est une grandeur vectorielle tridimensionnelle caractérisée par des variations aléatoires à petite échelle qui interviennent dans l'espace et dans le temps et qui se superposent à un écoulement organisé de grande échelle. On l'envisage sous cet aspect au regard, notamment, du transport des polluants et de l'atterrissement des aéronefs. Toutefois, pour les besoins du présent Guide, le vent en surface sera considéré principalement comme une quantité vectorielle bidimensionnelle définie par deux nombres représentant respectivement la direction et la vitesse. Les rafales sont des fluctuations rapides du vent dont l'importance est exprimée par leur « intensité ».

La plupart de ceux qui se servent de données anémométriques utilisent le vent horizontal moyen, généralement représenté, dans le cas d'un système de coordonnées polaires, par la vitesse et la direction. Toutefois, de plus en plus d'applications nécessitent également des informations sur la variabilité du vent (ou l'intensité des rafales). À cet effet, on utilise trois grandeurs, à savoir la rafale maximale et les écarts-types de la vitesse et de la direction du vent.

Les grandeurs moyennes sont les moyennes de grandeurs (par exemple la vitesse horizontale du vent) calculées sur une période de 10 à 60 minutes. Le présent chapitre traite essentiellement des moyennes calculées sur des intervalles de 10 minutes comme pour la prévision. Les statistiques climatiques exigent habituellement des moyennes pour chaque heure du jour et de la nuit. Les applications aéronautiques nécessitent parfois qu'elles soient calculées sur des intervalles plus courts (voir Partie II, chapitre 2). Des moyennes sur des périodes plus courtes que quelques minutes ne permettent pas de lisser suffisamment les fluctuations turbulentes du vent. Les « moyennes » d'une minute seront donc décrites comme des longues rafales.

La rafale maximale est la plus grande vitesse du vent observée sur une période de temps déterminée. Dans le cas de relevés météorologiques horaires, elle

correspond à la rafale la plus forte enregistrée au cours de l'heure précédente.

La durée de rafale désigne la durée de la plus forte rafale observée (la rafale maximale). Cette durée est fonction du temps de réponse du système de mesure. Les systèmes à réponse lente n'enregistrent pas les valeurs extrêmes et mesurent donc les longues rafales régulières ; quant aux systèmes à réponse rapide, ils peuvent enregistrer les rafales de front d'ondes de courte durée.

Pour définir la durée de rafale, on utilise une chaîne de mesure théorique, c'est-à-dire un seul filtre permettant d'obtenir une moyenne mobile sur t_0 secondes du signal de vent entrant. Les valeurs extrêmes observées après passage dans un tel filtre sont définies comme des rafales maximales de durée t_0 . On dit que des systèmes de mesure équipés de divers éléments filtrants enregistrent des rafales d'une durée t_0 lorsqu'un filtre à moyenne mobile caractérisé par un temps d'intégration t_0 aurait produit une valeur extrême de même grandeur (pour plus de détails voir Beljaars (1987) et WMO (1987)).

L'écart type s'exprime au moyen de la formule :

$$s_u = \sqrt{\overline{(u_i - U)^2}} = \sqrt{\left(\left(\sum u_i^2 \right) - \left(\sum u_i \right)^2 / n \right) / n} \quad (5.1)$$

où u est une variable dépendant du temps (par exemple, la vitesse horizontale du vent) de moyenne U ; la surbarre indique qu'il s'agit d'une moyenne ponctuelle des n éléments u_i de l'échantillon. L'écart type sert à déterminer l'ampleur des variations d'un paramètre donné.

La constante de temps (d'un système du premier ordre) est le temps nécessaire à un instrument pour détecter et indiquer environ 63 pour cent de la variation d'un échelon de la grandeur mesurée.

La longueur de réponse correspond approximativement au passage du vent (en mètres) nécessaire pour qu'un anémomètre indique environ 63 pour cent de la variation d'un échelon de la vitesse d'entrée.

L'amortissement critique (d'un capteur, une girouette, par exemple, dont une équation différentielle du deuxième ordre caractérise le mieux la réponse) est

la valeur de l'amortissement qui donne la réponse transitoire la plus rapide à un changement d'échelon sans qu'il y ait dépassement.

Le rapport d'amortissement est le rapport entre l'amortissement réel et l'amortissement critique.

La longueur d'onde naturelle non amortie est le passage de vent permettant à une girouette, en l'absence d'amortissement, de parcourir une période de l'oscillation suscitée. Elle est inférieure à la longueur

d'onde « amortie » réelle d'un facteur $\sqrt{(1 - D^2)}$ si D est le rapport d'amortissement.

Un vent variable sans direction moyenne est un vent dont la variation de la direction moyenne durant les 10 minutes passées est comprise entre 60° et 180° et dont la vitesse est inférieure à 6 km h^{-1} (3 kt ou 3 noeuds) ou dont la variation totale est de 180° ou plus.

5.1.2 Unités et échelles

La vitesse du vent devrait être exprimée à 0.5 m s^{-1} près ou si elle est exprimée en noeuds (0.515 m s^{-1}) avec arrondi à l'unité la plus proche. Dans les rapports synoptiques, elle devrait correspondre à la moyenne établie sur une période de dix minutes. On calcule parfois des moyennes sur une période plus courte à certaines fins aéronautiques (voir Partie II, chapitre 2).

La direction du vent devrait être exprimée en degrés et arrondie à la dizaine la plus proche, à l'aide du code 01, ..., 36 (ainsi, le code 02 signifie que la direction du vent varie de 15 à 25°). Elle devrait en outre correspondre à la moyenne établie sur une période de 10 minutes (voir Partie II, chapitre 2). La direction du vent est, par définition, la direction d'où le vent souffle, mesurée dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord géographique, à savoir le nord vrai.

L'état de « calme » est associé à une vitesse moyenne du vent inférieure à 1 noeud. Dans ce cas, la direction du vent est codée 00.

Les stations situées à moins de 1° du pôle Nord ou du pôle Sud devraient chiffrer leurs observations de la direction du vent de façon que le limbe d'azimut soit orienté de sorte que son zéro coïncide avec le méridien 0° de Greenwich.

La mesure et l'annonce de la vitesse et de la direction du vent à des fins aéronautiques sur les aérodromes pour le décollage et l'atterrissement des avions (voir partie II, chapitre 2) présente des différences

importantes par rapport aux besoins synoptiques. À toutes les stations d'observations météorologiques, la direction du vent doit être mesurée à partir de la détermination de l'azimut par rapport au nord géographique. Aux aérodromes, pour les observations aéronautiques, la direction du vent doit être indiquée et rapportée par rapport au nord magnétique et avec des moyennes calculées sur des intervalles de temps de 2 min. Lorsque les mesures du vent dans les aérodromes sont diffusées au-delà de l'aérodrome en tant que rapports synoptiques, la direction doit être référencée par rapport au nord géographique et avec des intervalles de temps de 10 minutes.

5.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Il faut disposer d'observations du vent pour surveiller et prévoir le temps, étudier le climat sous l'angle de la charge exercée par le vent, établir la probabilité des dommages dus au vent et évaluer l'énergie éolienne, dans le cadre de l'estimation des flux de surface (par exemple l'estimation de l'évaporation aux fins d'applications concernant l'agriculture ou la dispersion de la pollution atmosphérique). Les performances requises figurent à l'annexe 1.B du chapitre 1 de la partie I. Pour ce qui est de la vitesse horizontale, on s'accommode généralement d'une exactitude de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ au-dessous de 5 m s^{-1} , et de plus de 10 pour cent au-dessus. Quant à la direction du vent, elle devrait être mesurée avec une exactitude de 5° . Outre la vitesse et la direction moyennes du vent, nombre d'applications nécessitent que l'on connaisse également les écarts types et les valeurs extrêmes (voir section 5.8.2). Les instruments modernes permettent d'obtenir facilement l'exactitude requise. L'aspect le plus délicat de l'observation du vent réside dans l'exposition des anémomètres. Comme il est presque impossible de trouver un emplacement où la vitesse du vent soit représentative des vitesses relatives à une vaste région, il est recommandé d'effectuer des estimations des erreurs liées à l'exposition (voir section 5.9).

Bon nombre d'applications nécessitent des informations sur l'intensité des rafales de vent : prévision immédiate pour le décollage et l'atterrissement des aéronefs, climatologie fondée sur la charge exercée par le vent, problèmes de dispersion des polluants atmosphériques et correction selon l'exposition. Deux paramètres se prêtent aux observations courantes, à savoir l'écart type de la vitesse et de la direction du vent et la rafale maximale sur trois secondes (voir les recommandations 3 et 4 de la CIMO X, (OMM, 1990)).

Équivalents de la vitesse du vent

Échelle Beaufort et description	Équivalent de la vitesse du vent à une hauteur standard de 10 m au-dessus d'un terrain plat découvert			Spécifications pour l'estimation de la vitesse sur terre ferme	
	(kt) (nœud)	(m s ⁻¹)	(km h ⁻¹)	(mi h ⁻¹) (mph)	
0 Calme	<1	0 - 0,2	<1	< 1	Calme ; la fumée s'élève verticalement
1 Très légère brise	1 - 3	0,3 - 1,5	1 - 5	1 - 3	La direction du vent est mise en évidence par la dérive de la fumée, mais non par les girouettes
2 Légère brise	4 - 6	1,6 - 3,3	6 - 11	4 - 7	La peau du visage perçoit le déplacement d'air ; les feuilles frémissent ; les girouettes ordinaires se mettent en mouvement
3 Petite brise	7 - 10	3,4 - 5,4	12 - 19	8 - 12	Les feuilles et les brindilles sont constamment agitées ; le vent déploie les drapeaux légers
4 Jolie brise	11 - 16	5,5 - 7,9	20 - 28	13 - 18	Le vent soulève la poussière et les bouts de papier ; les petites branches sont agitées
5 Bonne brise	17 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	19 - 24	Les arbustes en feuilles commencent à se balancer ; de petites vagues avec crêtes se forment sur les eaux intérieures
6 Vent frais	22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	25 - 31	Les grosses branches sont agitées ; les fils télégraphiques font entendre un sifflement ; l'usage des parapluies est rendu difficile
7 Grand frais	28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	32 - 38	Les arbres sont agités en entier ; il devient difficile de marcher contre le vent
8 Coup de vent	34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	39 - 46	Le vent casse des rameaux ; il devient généralement presque impossible de marcher contre
9 Fort coup de vent	41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	47 - 54	Le vent occasionne de légers dommages aux bâtiments (mitres de cheminées et ardoises)
10 Tempête	48 - 55	24,5 - 28,4	89 - 102	55 - 63	Rare à l'intérieur des terres ; arbres déracinés ; importants dommages aux bâtiments
11 Violente tempête	56 - 63	28,5 - 32,6	103 - 117	64 - 72	Très rarement observé ; s'accompagne de ravages étendus
12 Ouragan	64 et plus	32,7 et plus	118 et plus	73 et plus	

5.1.4 Méthodes de mesure et d'observation

On mesure d'ordinaire les paramètres caractérisant le vent en surface au moyen de girouettes et d'anémomètres à coupes ou à pales. En l'absence d'instruments adéquats, ou lorsque ces instruments sont temporairement hors de service, il est possible de procéder à une

estimation subjective de la direction et de la force du vent (le tableau ci-dessous indique les équivalents de la vitesse du vent que l'on utilise habituellement).

Les instruments et techniques mentionnés ici ne représentent qu'une partie des instruments et des techniques les plus commodes actuellement disponibles.

Équivalents de la vitesse du vent pour les régions arctiques et les régions sans végétation

Échelle Beaufort et description	Équivalent de la vitesse du vent à une hauteur standard de 10 m au-dessus d'un terrain plat découvert			Spécifications pour l'estimation de la vitesse sur terre ferme	
	(kt) (nœud)	(m s ⁻¹)	(km h ⁻¹)	(mi h ⁻¹) (mph)	
0 Calme	<1	0 - 0,2	< 1	< 1	
1 Très légère brise	1 - 3	0,3 - 1,5	1 - 5	1 - 3	Pas de vent perceptible ; la fumée s'élève presque verticalement
2 Légère brise	4 - 6	1,6 - 3,3	6 - 11	4 - 7	La peau du visage perçoit le déplacement d'air ; les feuilles frémissent
3 Petite brise	7 - 10	3,4 - 5,4	12 - 19	8 - 12	Les cheveux sont dérangés ; les vêtements volent
4 Jolie brise	11 - 16	5,5 - 7,9	20 - 28	13 - 18	La poussière et les feuilles de papier sont soulevées, les cheveux défait
5 Bonne brise	17 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	19 - 24	Force de vent ressentie sur le corps ; limite du vent agréable sur terre
6 Vent frais	22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	25 - 31	Quelques inconvénients pour la marche
7 Grand frais	28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	32 - 38	Difficulté lors de la marche contre le vent
8 Coup de vent	34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	39 - 46	Équilibre difficile lors de la marche
9 Fort coup de vent	41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	47 - 54	Danger d'être renversé
10 Tempête	48 - 55	24,5 - 28,4	89 - 102	55 - 63	Arbres déracinés, considérables dommages structuraux
11 Violente tempête	56 - 63	28,5 - 32,6	103 - 117	64 - 72	
12 Ouragan	64 et plus	32,7 et plus	118 et plus	73 et plus	

Le présent chapitre ne fournit donc pas une liste exhaustive dans ce domaine. Les références et lectures complémentaires données à la fin du chapitre sont une bonne source pour de plus amples renseignements.

Les capteurs qui sont brièvement décrits ci-après sont des anémomètres rotatifs à coupes ou à pales et des girouettes. On associe fréquemment une girouette et un anémomètre à coupelles ou à pales, ou encore seulement des anémomètres à pales. D'autres capteurs classiques, comme le tube de Pitot, sont moins utilisés pour les observations courantes, mais peuvent donner des résultats de qualité convenable. Avec le développement des techniques, d'autres appareils, actuellement à l'étude ou employés uniquement pour les travaux de recherche, pourront également être utilisés pour mener à bien ce genre d'observations.

Pour la presque totalité des applications, il est nécessaire de mesurer les moyennes de la vitesse et de la

direction du vent. Beaucoup d'applications nécessitent aussi des informations sur l'intensité des rafales. Un dispositif de mesure du vent consiste donc non seulement en un capteur, mais aussi en un système de traitement et d'enregistrement des données. Par traitement, on entend le calcul des moyennes, des écarts types et des valeurs extrêmes. Sous sa forme la plus simple, ce traitement peut s'effectuer en enregistrant le signal de vent au moyen d'un enregistreur à plume et en estimant la moyenne et les valeurs extrêmes à partir du relevé ainsi obtenu.

5.2 ESTIMATION DU VENT

En l'absence d'instruments de mesure du vent, il faut avoir recours à l'estimation. Quoique les observations obtenues de cette façon soient souvent entachées d'importantes erreurs, cette méthode a

néanmoins le mérite de fournir des données qu'il convient naturellement d'exploiter avec précaution. La méthode peut se justifier pour fournir à certaines stations, des données qui autrement ne seraient en aucune manière disponibles. Si les données de vent de certaines stations sont obtenues temporairement ou définitivement par estimation, au lieu d'être mesurées, ce fait doit être signalé dans les enregistrements accessibles aux utilisateurs de données.

5.2.1 Vitesse du vent

C'est l'effet du vent sur des objets mobiles qui sert de base à l'estimation. Presque tout ce qui est monté de façon à flotter librement sous l'action du vent peut remplir le rôle d'indicateur, mais on trouvera particulièrement utiles les spécifications descriptives de l'échelle Beaufort de force du vent reproduites au tableau ci-dessus.

Pour procéder à l'estimation, l'observateur doit se tenir debout sur un terrain plat et dégagé, aussi loin que possible de tout obstacle (il en est de même pour l'objet sensible au vent). Il ne faut jamais oublier qu'un obstacle, même peu important, modifie sensiblement la vitesse et la direction du vent, surtout sur sa face abritée du vent.

5.2.2 Direction du vent

Si l'on ne dispose pas d'instruments ou que ceux-ci sont hors de service, il convient d'estimer la direction du vent en observant le déplacement de la fumée qui sort d'une haute cheminée, le mouvement des feuilles, ou de tout autre objet semblable, dans un endroit dégagé ou encore l'orientation d'une banderole ou d'un fanion fixé au sommet d'un grand mât. Sur un aéroport, on peut en outre se fonder sur les indications des manches à air, à condition que la vitesse du vent suffise à les mouvoir.

Quels que soient les moyens qu'il utilise, l'observateur pourra difficilement éviter les erreurs de perspective s'il ne se place pas à l'aplomb de l'indicateur. Il doit se garder de confondre les tourbillons localisés occasionnés par des constructions ou d'autres obstacles avec la direction générale du vent.

Dans des lieux découverts, la direction du vent en surface peut être estimée avec une exactitude acceptable en se plaçant face au vent. Le sens de déplacement des nuages, si bas soient-ils, ne devrait pas être pris en considération.

5.2.3 Variations du vent

Il faut renoncer à estimer les rafales maximales ou les écarts types si l'on ne dispose pas des instruments et des dispositifs d'enregistrement appropriés.

5.3 MÉTHODES INSTRUMENTALES SIMPLES

Dans les stations où il n'est pas possible d'installer des anémomètres classiques, on peut cependant utiliser certains instruments simples et peu coûteux qui permettent de faire des observations un peu plus fiables que celles obtenues par simple estimation.

5.3.1 Vitesse du vent

Si l'on utilise un anémomètre à main, il faut le placer et le lire conformément aux instructions du fabricant. L'observation doit être faite en un endroit bien exposé au vent, et non pas sous le vent d'obstacles divers (constructions, arbres, buttes). Si cela n'est pas possible, il faut faire en sorte que le lieu d'observation soit séparé de ces obstacles par une bonne distance, à savoir à au moins dix fois la hauteur de l'obstacle. Si l'obstacle est sous le vent de l'observateur ou disposé latéralement, cette distance doit être au moins égale à deux fois la hauteur de l'obstacle.

5.3.2 Direction du vent

Pour estimer la direction du vent, on peut installer sur un poteau une girouette (ou une bannière) munie de repères indiquant les principaux points de la rose des vents. L'observateur, placé au-dessous de la girouette, peut estimer la direction du vent en la rapportant au plus proche de ces 16 points. Si la girouette oscille constamment, il convient d'estimer la direction moyenne de part et d'autre de laquelle ces oscillations se produisent.

5.4 ANÉMOMÈTRES À COUPELLES ET À PALES

Pour déterminer la vitesse du vent, on utilise le plus souvent des anémomètres à coupelles ou à pales. Ces instruments sont constitués de deux sous-ensembles : un dispositif rotatif (ou moulinet) et un générateur de signaux. Dans les systèmes bien conçus, la vitesse angulaire du moulinet à coupelles ou à pales est directement proportionnelle à la vitesse du vent, ou plus précisément, dans le cas du moulinet à pales, à la composante de la vitesse du vent parallèle à l'axe de rotation. Ces anémomètres présentent également l'avantage d'avoir une réponse linéaire quelle que soit la densité de l'air, un bon zéro et une grande stabilité ; ils peuvent en outre être facilement fabriqués en série. Lorsque la vitesse du vent est voisine du seuil de démarrage de l'instrument (moins que 4 m s^{-1}), il peut arriver que les signaux ne soient pas du tout transmis de manière linéaire si le bras de liaison de la coupe à l'axe de rotation est beaucoup plus long que le diamètre de la coupe (Patterson, 1926).

La nature de la réponse des anémomètres à coupelles et à pales aux variations de la vitesse du vent peut être exprimée par la longueur de réponse, qui est directement proportionnelle au moment d'inertie du moulinet et est en outre fonction d'un certain nombre de facteurs géométriques (Busch and Kristensen, 1976; Coppin, 1982).

La plupart des anémomètres à coupelles et à pales réagissent plus rapidement lorsque le vent croît que lorsqu'il décroît, de sorte que la vitesse moyenne déterminée à partir de leurs indications dépasse la vitesse moyenne réelle. De plus, il arrive que les variations de la vitesse verticale du vent fassent tourner les anémomètres à coupes de façon excessive par suite de la moindre interférence des coupes en cas d'écoulement oblique (MacCready, 1966). Cette survitesse peut, au total, atteindre 10 pour cent dans le cas de certains modèles et dans certaines conditions de vent (anémomètre à coupes à longueur de réponse de 5 m installé à 10 m de hauteur en terrain très accidenté (Coppin, 1982)). Il est possible d'atténuer cet effet en utilisant des anémomètres à réponse rapide ; soit des anémomètres à coupe de conception vérifiée comme ayant une bonne réponse, soit des hélices à pales qui ne présentent, en théorie, aucune tendance à la survitesse liée à la composante verticale. Dans le cas où ces performances ne peuvent pas être étudiés en soufflerie, les anémomètres opérationnels peuvent être comparés dans ce domaine avec un anémomètre étalonné (Albers, Klug and Westermann, 2000).

Parce que leur vitesse angulaire est directement proportionnelle à la vitesse du vent ou à sa composante axiale, les anémomètres à coupelles et à pales se prêtent particulièrement bien à la transmission à l'aide d'une vaste gamme de générateurs de signaux. Des générateurs de courant alternatif et continu, des générateurs d'impulsions optiques et magnétiques ainsi que des cadrans et des enregistreurs indiquant le nombre de tours ont été utilisés (WMO, 2001). Le choix du générateur de signaux, ou transducteur, dépend surtout du type de dispositif utilisé pour le traitement et l'affichage des indications fournies. Il faut veiller à ce que les couples de démarrage et de frottement des roulements et du générateur de signaux soient les plus faibles possibles et que le moment d'inertie de ce dernier ne réduise pas exagérément la réponse. Pour les transmissions à longue distance, les signaux de tension décroissent à cause des pertes dues à la résistance du câble et ils sont alors inférieurs à la fréquence des signaux qui n'est pas affectée durant la transmission.

Les caractéristiques nécessaires et réalisables pour les capteurs de vitesse du vent figurent à l'annexe 1.B du chapitre 4, partie I,

5.5

GIROUETTES

Pour que les mesures soient satisfaisantes, il faut que la girouette soit bien équilibrée, c'est-à-dire qu'elle ne prenne pas une position préférentielle lorsque son axe n'est pas vertical. Si la girouette a plusieurs ailettes, il est préférable qu'elles soient parallèles à son axe, car si deux ailettes font un angle de plus de 10° avec cet axe, la girouette aura deux positions d'équilibre qui diffèrent significativement de la direction réelle du vent (Wieringa and van Lindert, 1971).

La réponse d'une girouette courante à faible amortissement à un changement brusque de la direction du vent se traduit normalement par un mouvement ample et une oscillation décroissant de manière approximativement exponentielle autour de sa position vraie. Deux variables servent à définir cette réponse : la « fréquence naturelle non amortie », ou « longueur d'onde » et le « rapport d'amortissement », c'est-à-dire le rapport entre l'amortissement réel et l'amortissement critique (MacCready, 1966; Mazzarella, 1972). On considère comme satisfaisant un rapport d'amortissement compris entre 0,3 et 0,7, car les mouvements de la girouette ne sont en ce cas pas trop amples et sa réponse est suffisamment rapide (Wieringa, 1967). Là où une moyenne sur une période relativement longue doit être calculée à partir des données capturées à intervalles courts, il est évident que des taux d'amortissement plus faibles peuvent être acceptables.

Le générateur de signaux consiste essentiellement en un axe qui transmet les mouvements angulaires. De nombreux dispositifs ont été utilisés à cet effet. De bons résultats ont été obtenus avec des potentiomètres, des dispositifs synchrones à courant continu et à courant alternatif, des disques numériques de codage angulaire, des cadrans à lecture directe et des commutateurs rotatifs. Le choix du générateur de signaux dépend surtout du type de dispositif utilisé pour le traitement et l'affichage des indications fournies. Il faut veiller à ce que les couples de démarrage et de frottement des roulements et du générateur de signaux soient les plus faibles possibles. La méthode la plus simple d'enregistrement est d'avoir une feuille montée autour d'un cylindre en rotation avec l'axe de la girouette, sur laquelle un instrument d'écriture se déplace lentement de haut en bas.

L'exactitude absolue de la mesure de la direction dépend aussi de l'attention accordée au fait que l'instrument est bien aligné avec le nord géographique. Les caractéristiques nécessaires et réalisables pour les girouettes sont données dans l'annexe 1.B du chapitre 1 de la partie I.

5.6 AUTRES DISPOSITIFS

On peut se fonder sur de nombreux principes physiques pour mesurer la vitesse et la direction du vent, chacun d'eux ayant ses avantages et ses inconvénients particuliers. De nouveaux systèmes ont été élaborés dans des buts précis comme la mesure des fluctuations à petite échelle et l'étude de la pollution atmosphérique (voir, par exemple, Smith (1980)). Voici, ci-dessous, d'autres types de dispositifs :

- (a) Les anémomètres à tube de Pitot qui mesurent la surpression dans un tube maintenu dans la direction du vent par une girouette (pour la description de l'anémomètre de Dines, voir Gold (1936) et WMO (1984a)). Le système d'enregistrement traite le problème posé, pour le calcul du vent moyen, par la nature quadratique de la relation entre la vitesse du vent et la pression. Il fournit aussi des enregistrements utiles des rafales de vent sans demander d'énergie électrique ;
- (b) Les anémomètres soniques, qui mesurent le temps écoulé entre l'émission et la réception d'une impulsion ultrasonique sur une distance fixe (Kaimal, 1980). Parce qu'ils n'ont aucune partie mobile en raison de leur principe, ils ont une grande durabilité et une faible détérioration de leur exactitude ;
- (c) Les anémomètres thermiques à semi-conducteur mesurent le gradient de température à travers un dispositif exposé au vent. Ils fournissent à la fois la vitesse et la direction du vent avec des exactitudes conformes aux spécifications de l'annexe 1.B, chapitre 1, partie I (Van Oudheusden and Huijsing, 1991 ; Makinwa, Huijsing and Hagedoorn, 2001). Ils sont robustes et stables dans l'étalonnage, mais leur expérience opérationnelle est encore limitée ;
- (d) Les anémomètres à fil chaud mesurent le refroidissement de minces fils chauffés. Sur le plan opérationnel, ils sont peu fiables, tant en raison de leur fragilité excessive que parce que leur étalonnage change assez rapidement dans des environnements sales ou humides. Ils ne sont pas recommandés pour une utilisation pendant les précipitations ;
- (e) Les anciennes girouettes à pales qui valent un peu mieux que si on n'a pas d'instrument du tout ;
- (f) Les dispositifs de télédétection par ondes sonores (SODAR), lumineuses (LIDAR) ou électromagnétiques (RADAR) sont rarement employés pour les observations météorologiques courantes et ne sont donc pas étudiés dans le présent Guide. Des détails sont donnés dans Lenschow (1986).

5.7

CAPTEURS ET COMBINAISON DE CAPTEURS POUR LA MESURE DES COMPOSANTES

Les pales, parce qu'elles ne réagissent qu'à la composante de la vitesse du vent qui est parallèle à l'axe du moulinet, peuvent être montées perpendiculairement l'une à l'autre, de manière à fournir deux valeurs directement proportionnelles aux composantes dans les directions des axes. D'autres capteurs tels que les anémomètres acoustiques bi-axiaux peuvent remplir les mêmes fonctions pour peu qu'on leur ajoute des éléments électroniques plus complexes. Dans le cas de pales perpendiculaires, il est toutefois difficile d'obtenir une réponse qui soit exactement conforme à la loi du cosinus (c'est-à-dire la sensibilité à une seule composante). On peut aussi utiliser un anémomètre à coupes associé à une girouette, ou encore une girouette à hélice, comme dispositif constitutif lorsque les composantes de la vitesse sont calculées à partir des valeurs mesurées de la vitesse et de la direction du vent.

5.8

MÉTHODES DE TRAITEMENT DES DONNÉES

Il existe bien des façons de traiter les signaux transmis par les anémomètres et les girouettes et d'en faire la moyenne. Avant d'aborder les différents aspects de l'ensemble de la chaîne de mesure du vent (exposition, détection, transmission, filtrage, enregistrement et traitement), nous nous pencherons sur la question de la détermination du vent moyen. Pour les besoins du présent Guide, nous nous limiterons aux sorties suivantes : vent horizontal moyen (composantes de la vitesse et de la direction du vent), écarts types et rafale maximale.

5.8.1

Détermination du vent moyen

La détermination du vecteur vent moyen, ou de ses composantes, s'effectue en principe directement, mais soulève cependant quelques difficultés particulières. Tout d'abord, le vecteur vent moyen dans la direction moyenne U est légèrement plus faible que la moyenne de toutes les vitesses instantanées, généralement de quelques pour cent (MacCready, 1966 ; Wieringa, 1980a). Cette erreur peut être corrigée, si nécessaire, si l'écart type de la direction du vent s_d est mesuré ; étant donné que le rapport entre U et la moyenne des vitesses instantanées est donné par (Frenkiel, 1951) :

$$U / \sqrt{u_i^2 + v_i^2} = 1 - s_d^2 / 2 \quad (5.2)$$

Cet effet de la turbulence du vent est souvent confondu avec la surestimation (survitesse), provoquant une distorsion dans l'écart type su (voir section 5.4)

La deuxième difficulté réside dans la discontinuité de la direction du vent entre 0 et 360°. En cas d'enregistrement sur un cylindre, le problème peut être résolu en portant l'intervalle d'enregistrement à, par exemple, 540° (un dispositif électronique effectue la commutation de l'intervalle 0°-360° à l'intervalle 540°-180°) ou en ayant recours à un algorithme informatisé qui assure la continuité des échantillons successifs en ajoutant ou en retranchant 360°. Le fait que les anémomètres à coupes ont une réponse du premier ordre, que les girouettes ont une réponse du deuxième ordre et qu'il est impossible de faire concorder leurs réponses n'a guère d'importance dans la mesure où les différences des réponses ne se reflètent que dans la partie des fluctuations correspondant aux hautes fréquences.

En théorie, il vaut mieux faire la moyenne des composantes que de calculer séparément la moyenne de la vitesse et de la direction. Les écarts sont toutefois minimes et, pour la plupart des applications, les moyennes relatives aux composantes peuvent être facilement déduites des moyennes de la vitesse et de la direction. Il en va de même des écarts types correspondants. D'un point de vue technique, il est préférable de procéder à un traitement distinct de la vitesse et de la direction, et cela pour un certain nombre de raisons : premièrement, ce traitement distinct des signaux fait qu'un instrument peut continuer à remplir sa fonction si l'autre tombe en panne ; deuxièmement, la réduction des données soulève moins de difficultés que dans le cas où il faut faire des calculs pour les diverses composantes ; et troisièmement, le traitement distinct de la vitesse et de la direction est d'un usage courant (par exemple pour ce qui concerne les codages SYNOP et SHIP).

Il existe divers dispositifs, mécaniques et électriques, permettant d'établir des moyennes de la vitesse horizontale du vent. L'exemple le plus simple est sans doute l'enregistreur du nombre de révolutions effectuées par un anémomètre à coupes, couramment utilisé pour mesurer le passage du vent durant un intervalle de temps déterminé. À l'autre extrémité du spectre de la complexité, les générateurs d'impulsions électriques entraînant des processeurs numériques dédiés, permettent de calculer aisément les moyennes, les rafales maximales et les écart-types.

Lorsque la vitesse et la direction du vent sont enregistrées sous la forme de graphiques continus, un observateur est alors en mesure d'estimer avec une

assez bonne exactitude les moyennes sur dix minutes. Le tracé enregistré permet en outre de déterminer les rafales maximales. On peut aussi se faire une idée de la vitesse du vent et de sa variabilité en observant un cadran ou un compteur, mais les résultats obtenus sont trop entachés d'erreurs pour qu'on puisse en déduire des moyennes fiables. Les instruments à cadran ou à compteur ne conviennent donc guère lorsqu'il s'agit de calculer des moyennes sur dix minutes pour des bulletins météorologiques standard.

5.8.2 **Rafales maximales et écarts types**

Le calcul ou l'enregistrement des variations du vent sont extrêmement sensibles à la réponse dynamique de tous les éléments de la chaîne de mesure et notamment à la longueur de réponse et au rapport d'amortissement des capteurs. De plus, c'est la réponse dynamique du système dans son ensemble qui détermine la durée des rafales maximales (voir définition à la section 5.1.1). Les systèmes à réponse lente amortissent les valeurs extrêmes et signalent par conséquent de longues rafales de faible ampleur, alors que les systèmes à réponse rapide enregistrent des rafales maximales brèves et intenses (rafales de courte durée). Il est clair que la réponse dynamique des systèmes de mesure du vent doit être étudiée avec soin pour obtenir des valeurs de rafale (ou des écarts types) précises et sûres et compatibles d'une station à l'autre.

Avant de préciser les caractéristiques adéquates des systèmes de mesure du vent en matière de réponse, il est nécessaire de définir la durée de rafale requise par l'application envisagée. On utilise les valeurs extrêmes essentiellement à des fins d'alerte et dans le cadre de la climatologie des charges extrêmes qui s'exercent sur les bâtiments, les constructions et les aéronefs. Il faut bien se rendre compte que les rafales les plus brèves n'ont ni le temps, ni l'ampleur horizontale nécessaires pour que leur effet dommageable s'exerce pleinement sur les constructions importantes. D'après (WMO, 1987), la plupart des utilisateurs potentiels s'accordent d'une durée de rafale d'environ trois secondes. Des rafales qui persistent pendant trois secondes environ correspondent à un « parcours du vent » (la durée multipliée par la vitesse moyenne du vent) de l'ordre de 50 à 100 mètres dans des conditions de vent fort. Cela suffit pour que le vent s'engouffre dans les ouvrages de dimensions ordinaires, de type suburbain/urbain, et que ceux-ci soient exposés à la pleine charge d'une rafale potentiellement dommageable.

Lorsque l'on dispose de micro-ordinateurs, il est facile de calculer l'écart type de la vitesse et de la direction du vent en prélevant des échantillons des signaux à des intervalles d'environ une seconde. La

fréquence d'échantillonnage ne devrait pas être plus grande car le capteur lui-même fournit un lissage sur un multiple de sa propre longueur de réponse (Wieringa, 1980b). Une fréquence d'échantillonnage de 0,25 Hz est adaptée dans la plupart des cas, mais tout dépend de la longueur de réponse du capteur et de la vitesse du vent. Un exposé détaillé de la théorie de l'échantillonnage des signaux des capteurs est donné dans le chapitre 2 de la partie III.

Le calcul de l'écart type de la vitesse horizontale du vent sur un intervalle de 10 minutes en même temps que la détection des rafales avec une durée de quelques secondes se traduit par des exigences intéressantes concernant les filtres électroniques. En pratique, le système est optimisé pour les rafales car elles sont l'élément le plus critique en matière de filtrage. N'importe quel filtre passe-bas utilisé pour la détection des rafales maximales mesurées par un anémomètre rapide, avec un lissage sur quelques secondes, peut réduire l'écart type de près de 10 pour cent. Cette réduction peut être facilement corrigée, à condition que l'on connaisse bien le système de mesure et l'ensemble des variables du filtre. Souvent, dans la pratique, la réduction est moindre car l'écart type augmente si la vitesse moyenne du vent montre une tendance positive ou négative. Sinon, le signal non filtré peut être enregistré séparément dans le but de mesurer un écart type non biaisé. Des recommandations sont données dans la section suivante pour les systèmes de mesure du vent avec des valeurs exactes pour les variables du filtre.

Pour mesurer avec exactitude les rafales maximales, il est préférable d'échantillonner le signal de vent filtré tous les quarts de seconde (fréquence de 4 Hz). Il est possible d'adopter de plus faibles fréquences d'échantillonnage, mais il faut comprendre qu'en ce cas les valeurs extrêmes estimées seront généralement plus faibles, puisque le maximum dans le signal filtré peut se produire entre deux valeurs échantillonées.

Hormis l'amortissement inertiel des girouettes, tout filtrage supplémentaire devrait être évité lors de la détermination de la direction du vent. Cela devrait permettre de déterminer l'écart type de la direction du vent à deux pour cent près à l'aide de la plupart des girouettes utilisées.

La mesure exacte de l'écart type de la direction du vent nécessite une résolution minimale du processus de numérisation, qui s'effectue d'ordinaire sur l'axe de la girouette au moyen d'un codeur numérique. Une résolution de sept bits suffit, dans la mesure où un écart type de cinq degrés peut être encore mesuré avec une exactitude de un pour cent (WMO, 1987).

5.8.3

Recommandations pour la conception des systèmes de mesure du vent¹

Il existe de nombreuses façons de concevoir des systèmes de mesure du vent, et il est impossible de passer en revue toutes les solutions techniques envisageables dans le présent Guide. On s'en tiendra à deux exemples courants : l'un impliquant le traitement de signaux essentiellement analogiques et l'autre, le traitement de signaux numériques (WMO, 1987).

Le premier système comprend un anémomètre à longueur de réponse de cinq mètres, un générateur d'impulsions produisant des impulsions selon une fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation de l'anémomètre (de préférence, plusieurs impulsions par rotation), un dispositif de comptage permettant de déterminer le nombre d'impulsions tous les quarts de seconde et un micro-ordinateur destiné à calculer les moyennes et l'écart type à 10 minutes d'intervalle à partir d'échantillons prélevés tous les quarts de seconde. La valeur extrême doit être déduite de moyennes établies sur trois secondes, donc obtenues en faisant la moyenne des valeurs correspondant aux 12 derniers échantillons. Cette moyenne doit être calculée tous les quarts de seconde (ce qui suppose un chevauchement des moyennes sur trois secondes tous les quarts de seconde). La direction du vent est mesurée au moyen d'une girouette, caractérisée par une longueur d'onde non amortie de 5 mètres et un rapport d'amortissement de 0,3, et d'un codeur numérique sept bits, échantillonné toutes les secondes. Toutes les 10 minutes, le système calcule les moyennes et les écarts types et s'assure de la continuité des échantillons successifs. Si deux échantillons successifs diffèrent de plus de 180°, la valeur du deuxième échantillon est corrigée par addition ou soustraction de 360°. Une longueur de réponse de 5 mètres de l'anémomètre et de la girouette (rapport d'amortissement de 0,3, longueur d'onde non amortie de 10 m) permet de réduire les écarts types de la vitesse et de la direction du vent d'environ sept et deux pour cent respectivement. La durée de rafale correspondant à l'ensemble du processus de mesure (voir section 5.1.1) est d'environ trois secondes.

Le deuxième système est constitué d'un anémomètre doté d'une longueur de réponse de 5 mètres, d'un générateur produisant une tension proportionnelle à la vitesse de rotation de l'anémomètre, d'un convertisseur analogique-numérique intervenant toutes les secondes et d'un dispositif de tra-

¹ Recommandées par la Commission des Instruments et des Méthodes d'Observation lors de sa dixième session (1989).

tement numérique des échantillons. La direction du vent est mesurée au moyen d'une girouette, caractérisée par une longueur d'onde non amortie de 5 mètres et un rapport d'amortissement de 0,3, d'un convertisseur analogique-numérique intervenant toutes les secondes et d'un dispositif de calcul numérique des moyennes et des écarts types. Pour déterminer la rafale maximale, la tension est atténuée au moyen d'un filtre du premier ordre caractérisé par une constante de temps d'une seconde, la conversion analogique-numérique intervenant tous les quarts de seconde. S'agissant du filtrage, ce système diffère légèrement du premier en cela que les écarts types de la vitesse et de la direction du vent sont réduits de 12 et deux pour cent respectivement, la durée de rafale s'établissant toujours à trois secondes environ. Le convertisseur analogique-numérique peut en outre être remplacé par un enregistreur à plume raccordé à la sortie analogique. En ce cas, on ne peut obtenir que les moyennes et les valeurs extrêmes ; quant à la durée de rafale, elle est toujours d'environ trois secondes, à moins que l'enregistreur réagisse plus lentement que le filtre du premier ordre.

Le processus de traitement des signaux décrit ci-dessus est conforme à la recommandation 3 de la CIMO-X (WMO, 1990) et garantit une exactitude optimale. Ce processus est cependant assez complexe et exigeant, puisqu'il implique un chevauchement des moyennes et une fréquence d'échantillonnage relativement élevée. Pour bon nombre d'applications, on peut tout à fait se contenter de prélever un échantillon toutes les trois secondes, pourvu que les moyennes soient également calculées toutes les trois secondes (c'est-à-dire à des intervalles qui ne se chevauchent pas). En ce cas, la durée de rafale est d'environ cinq secondes et l'écart type est réduit de 12 pour cent (Beljaars, 1987 ; WMO, 1987).

5.9 EXPOSITION DES INSTRUMENTS ANÉMOMÉTRIQUES

5.9.1 Problèmes généraux

La vitesse du vent augmente considérablement à mesure que l'on s'élève, particulièrement au dessus d'un terrain rugueux. C'est pourquoi l'on a défini une hauteur standard de 10 m pour l'exposition des instruments anémométriques utilisés en terrain dégagé. Le changement correspondant de la direction du vent en fonction de la hauteur reste relativement minime et peut être ignoré pour les observations du vent en surface. La localisation optimale pour l'observation du vent est celle où le vent observé est représentatif des conditions présentes sur une zone

d'au moins quelques kilomètres, ou qu'il puisse être aisément corrigé pour qu'il le soit.

En terrain accidenté, parsemé d'obstacles ou présentant un couvert superficiel hétérogène, la vitesse et la direction du vent peuvent varier considérablement. Il est souvent possible de procéder à des corrections, et l'on dispose maintenant des outils permettant de les calculer. Pour améliorer l'application des données anémométriques, les mesures directes communiquées aux usagers devraient être accompagnées des informations essentielles concernant l'exécution de ces corrections.

5.9.2 Utilisation des anémomètres sur la terre ferme

La hauteur standard des instruments anémométriques utilisés en terrain plat et dégagé est de 10 m au-dessus du sol. Un terrain dégagé est défini comme un terrain où la distance entre l'anémomètre et un quelconque obstacle est au moins égale à dix fois la hauteur de cet obstacle. Les observations du vent qui sont faites dans le sillage direct de rangées d'arbres, de bâtiments ou de tout autre obstacle sont peu fiables et renseignent peu sur le vent non perturbé. Comme le sillage peut s'étendre, en aval d'un obstacle, sur une distance égale à 12 à 15 fois la hauteur de cet obstacle, l'exigence d'un éloignement correspondant à 10 fois la hauteur de l'obstacle constitue un minimum absolu. En pratique, il est souvent difficile de trouver un emplacement convenable, ou même simplement acceptable, pour y installer une station anémométrique. On n'insistera jamais assez sur l'importance du choix d'un emplacement optimal, même s'il est difficile de donner à ce sujet des principes directeurs universels.

Deux aspects sont particulièrement importants. Premièrement, il faut veiller à ce que les instruments restent autant que possible à l'écart des perturbations locales. Lorsque des mesures de vent sont prises sur le côté de mâts ou de tours plutôt qu'à leur sommet, les instruments devraient être placés sur des flèches d'une longueur égale à au moins trois fois la largeur des mats ou des tours (Gill and others, 1967). Lorsque les instruments de mesure du vent sont placés au dessus d'un bâtiment, ils devraient être élevés, au-dessus de son sommet, d'au moins une fois la largeur du bâtiment. Deuxièmement, il faut sérieusement se documenter au sujet de ces perturbations (Wieringa, 1983). Il devrait exister au moins un plan des environs de la station dans un rayon de 2 km, avec des informations sur la localisation et la hauteur des obstacles et de la végétation, les changements d'altitude du terrain, et ainsi de suite. Les changements dans l'environnement, tels que la construction de bâtiments ou la croissance

des arbres à proximité, doivent être explicitement enregistrés dans les registres de la station. L'instrumentation de la station doit être spécifiée de façon détaillée.

Lorsqu'il est impossible d'obtenir une exposition standard, il convient d'installer l'anémomètre à une hauteur telle que ses indications soient le moins possible influencées par la présence d'obstacles locaux et qu'elles décrivent, dans la mesure du possible, ce que le vent serait à 10 mètres s'il n'y avait pas d'obstacles à proximité. Si le terrain varie peu selon l'azimut, on peut placer l'anémomètre à une hauteur qui dépasse les 10 mètres standard d'une quantité dépendant de la rugosité de surface effective z_0 du terrain environnant (voir l'annexe) : autour de 13 m si $z_0 = 0,1\text{m}$ et de 19 m si $z_0 = 0,5\text{ m}$. Wieringa (1980b) a montré que la méthode consistant à surélever l'anémomètre s'avère insuffisante si les obstacles locaux sont répartis de façon très inégale selon l'azimut. Des méthodes de calcul simples permettent de nos jours de cerner avec précision l'incidence de la topographie locale (Walmsley and others, 1990), et l'on peut recourir à la climatologie des observations relatives aux rafales pour déterminer les corrections dans un environnement hétérogène (Verkaik, 2000). Le problème pour les zones urbaines est abordé dans (Evans and Lee, 1981) et (Grimmond and others, 1988) ; voir aussi le chapitre 11, partie II.

Des précautions spéciales sont à prendre afin de préserver les instruments anémométriques des accumulations de givre et de glace. En certains endroits, il peut être judicieux de prévoir une forme quelconque de chauffage artificiel pour les parties exposées, par exemple un radiateur à infrarouge équipé d'un thermostat. Il existe des écrans de protection contre le givre et la glace pour des types particuliers d'instruments anémométriques (voir Curran and others, 1977).

5.9.3 Utilisation des anémomètres en mer

La nécessité de mesurer le vent en mer s'impose de plus en plus, surtout au moyen de systèmes automatiques sans surveillance (voir aussi le chapitre 4, partie II). Cette tâche soulève des problèmes particuliers, puisqu'il n'est pas toujours possible de respecter la hauteur d'exposition standard de 10 m prescrite pour les instruments installés à terre, en raison de l'état de la mer et/ou de la marée. En procédant par simple extrapolation des critères d'exposition en vigueur sur la terre ferme, on pourrait penser qu'il suffit, sur une bouée ancrée, d'installer l'anémomètre 10 mètres au-dessus de la ligne de flottaison de cette dernière. Il existe cependant des sources d'erreur plus importantes que celles découlant des va-

riations de la hauteur d'exposition (pour une revue voir (WMO, 1981)). Dans le cas des plateformes et des navires, il est extrêmement important que les capteurs soient placés assez haut au-dessus de la plateforme et de sa superstructure, afin de limiter l'influence souvent considérable de ces éléments sur la structure locale du vent. En règle générale, rien ne permet d'affirmer qu'un instrument anémométrique n'est pas influencé par la plateforme où il se trouve, même s'il est installé au moins 10 m au-dessus de l'obstacle le plus élevé, à moins que cette plateforme soit relativement petite. Le rapport (WMO, 1981) conclut que, pour obtenir des mesures précises et exploitables en mer, une bonne exposition prime sur la normalisation des observations à 10 m de hauteur (WMO, 1989). En pratique, malgré tout le soin apporté au choix de l'emplacement des instruments, il est souvent impossible d'éviter les erreurs afférentes à l'exposition. Pour que les corrections liées à la hauteur et aux perturbations de l'écoulement puissent être effectuées, il importe de faire un relevé et de réunir des informations détaillées au sujet de l'emplacement de l'anémomètre et du type de plateforme ou de navire (forme, dimensions). Si la vitesse du vent est mesurée à une hauteur significativement supérieure à 10 m (à savoir, lorsque le facteur de réduction approprié serait supérieur à 1,2), une réduction au niveau de 10 m doit être effectuée conformément aux procédures recommandées dans le paragraphe suivant, et en utilisant la constante donnée pour la rubrique « pleine mer » dans le tableau de l'annexe.

5.9.4 Correction des effets de l'exposition

Il est rare que les observations du vent en surface ne suscitent pas des problèmes d'exposition. Il est difficile de trouver un terrain plat et dégagé, et la plupart des stations anémométriques terrestres sont perturbées par des particularités du relief, du couvert superficiel ou de ces deux éléments à la fois (WMO, 1987; Wieringa, 1996).

Il est manifeste que les erreurs résultant de l'exposition embarrassent les utilisateurs de données anémométriques et rendent souvent ces données inutilisables. Ce problème est particulièrement grave dans le cas des modèles de prévision numérique, où les champs de vent et de pression sont d'ordinaire analysés séparément. Les vents de surface ne peuvent toutefois être utilisés pour l'initialisation que s'ils sont représentatifs à l'échelle d'une vaste zone. Cela oblige donc à éliminer les erreurs dues à l'exposition locale ou à une hauteur d'observation non conforme.

Il n'est possible de procéder à la correction des observations anémométriques, en fonction de l'expo-

sition locale, que si l'on dispose de mesures d'une qualité acceptable effectuées en des endroits raisonnablement bien exposés, relativement plats et pas trop rugueux ($z_0 \leq 0.5$ m). Il faut renoncer à corriger des mesures qui n'ont guère de rapport avec la moyenne régionale. Ainsi, les observations d'une station anémométrique installée dans une vallée profonde, où l'écoulement est caractérisé par des effets catabatiques, jouent un rôle important pour les prévisions locales, mais ne sauraient constituer des mesures représentatives du régime des vents au plan régional.

Si la vitesse du vent U est mesurée à la hauteur z , la vitesse corrigée U_c qui serait indiquée localement à 10 m au-dessus d'un terrain de rugosité z_0 s'exprime par :

$$U_c = U \cdot C_F \cdot C_T \cdot \frac{\ln(10/z_{0u})}{\ln(z/z_{0u})} \cdot \frac{\ln(60/z_{0u}) \ln(10/z_0)}{\ln(10/z_{0u}) \ln(60/z_0)} \quad (5.3)$$

où C_F est la correction de la distorsion du flux ; C_T , le facteur de correction relatif aux effets topographiques ; z_{0u} , la longueur de rugosité du terrain situé en amont de la station et z_0 , la longueur de rugosité propre à l'application (par exemple une valeur de la grille du maillage dans le cas d'un modèle de prévision numérique). Dans cette équation, z , z_0 et z_{0u} doivent être exprimés en mètres. La signification des différents facteurs de correction est la suivante :

- (a) Distorsion de l'écoulement : Le facteur de correction C_F concerne la distorsion de l'écoulement causée par les grands obstacles proches. Elle est particulièrement prononcée dans le cas des anémomètres installés sur des constructions, des navires et des plateformes en mer. La simulation par modèle en soufflerie aérodynamique constitue la meilleure façon de déterminer C_F en fonction de la direction du vent (Mollo-Christensen and Seesholtz, 1967). Il est aussi possible de procéder à des estimations sur la base de l'écoulement potentiel autour de configurations simples (Wyngaard, 1981 ; WMO, 1984b). Pour les mesures aux sommets de mats autoportants, la distorsion de l'écoulement peut être négligée ($C_F = 1$).
- (b) Correction topographique : Cette correction concerne les effets du relief autour de la station anémométrique. C_T est le rapport entre la vitesse moyenne du vent à l'échelle régionale (calculée à partir des observations effectuées sur les crêtes et dans les vallées à dix mètres de hauteur au-dessus du sol) et la vitesse du vent observée à la station. Dans le cas d'une station installée au sommet d'une colline isolée, C_T doit être inférieur à 1 pour corriger l'augmen-

tation de la vitesse suscitée par ce relief et rendre ainsi le résultat représentatif des conditions régnant dans l'ensemble de la région, et pas seulement en haut de la colline en question. En terrain plat, C_T est égal à 1. Dans le cas de collines et de crêtes isolées, des directives simples permettent de procéder à des estimations de C_T (Taylor and Lee, 1984). Lorsque le relief est plus complexe, il faut alors recourir à des calculs réalisés à l'aide de modèles sur la base de cartes topographiques détaillées du terrain entourant les stations anémométriques (Walmsley and others, 1986). Ces calculs, d'une assez grande complexité, ne doivent cependant être effectués qu'une fois pour chaque station et conduisent à établir une table quasi permanente des valeurs de C_T en fonction de la direction du vent.

- (c) Hauteur d'observation non standard : Cet effet est simplement corrigé en retenant l'hypothèse d'un profil logarithmique allié à la longueur de rugosité z_{0u} du terrain situé en amont. Pour les stations installées en mer, cette réduction à la hauteur standard peut être importante, mais les corrections relatives à la stabilité sont en ce cas relativement minimes, ce qui justifie le caractère logarithmique de ce facteur de correction.
- (d) Effets de la rugosité : Il est possible de corriger les effets de la rugosité du terrain situé en amont ainsi que ceux des obstacles se trouvant à la surface en procédant à une extrapolation logarithmique de la vitesse du vent jusqu'à une hauteur de 60 mètres avec la longueur de rugosité z_{0u} propre à la station, puis à une interpolation à 10 mètres de hauteur avec la longueur de rugosité z_0 que nécessite l'application. La longueur de rugosité z_{0u} doit être représentative des conditions qui règnent dans un fetch de 2 km au vent de la station anémométrique, et sa valeur varie généralement selon la direction du vent. L'annexe donne des indications pour estimer z_{0u} .

Si la distorsion des flux et les problèmes de topographie sont négligeables ou ont été corrigés, il faut appliquer les corrections d'exposition (c) à (d) par la formule (5.3) avec $z = 10$ m et $z_0 = 0,03$ m. Les vitesses de vent corrigées seront alors équivalentes à celles qui seraient mesurées à une station anémométrique locale hypothétique entièrement conforme aux exigences de l'OMM (10 m en terrain découvert). Les vitesses du vent corrigées de cette manière sont appelées vitesses de vent potentielles (WMO, 2001). Deux remarques sont à faire ici. En premier lieu, cette hauteur de 60 m ne doit pas être considérée comme intangible. Toute hauteur située entre 40 et 80 mètres aurait aussi bien été acceptable. 60

mètres représentent à peu près la hauteur correcte eu égard au fetch de 2 km pour lequel z_{0u} est représentatif, et il s'est avéré que les résultats obtenus avec cette hauteur étaient satisfaisants (Wieringa, 1986). Deuxièmement, on ne peut négliger les corrections des profils du vent liées à la stabilité dans l'intervalle compris entre 10 et 60 m de hauteur. Si, dans la présente formule, l'effet de la stabilité est relativement faible, c'est que les corrections liées à ce facteur qui interviennent lors de l'extrapolation vers le haut et de l'interpolation vers le bas s'annulent approximativement. Un exemple pratique de l'application de la correction des mesures de vent dans un contexte opérationnel est donné dans (WMO, 2000 et 2001). Bien que la plupart des corrections des effets de l'exposition puissent être directement appliquées aux mesures, aussi bien les valeurs non corrigées (niveau I), que les valeurs corrigées (niveau II), doivent être diffusées.

5.10 ÉTALONNAGE ET ENTRETIEN

Ce n'est qu'en soufflerie aérodynamique qu'on peut étalonner avec une pleine efficacité les girouettes et les anémomètres à coupes et à pales. Toutefois, les performances de ces instruments sont maintenant bien connues et, pour peu qu'ils soient en bon état, on peut d'ordinaire se fier à l'étalonnage indiqué par le fabricant. Les essais en soufflerie ne sont utiles que dans le cas de projets spéciaux ou d'essai de nouveaux modèles.

Sur le terrain, les anémomètres peuvent se détériorer, et il est judicieux de les inspecter régulièrement. Un endommagement matériel, le frottement des roulements (par pénétration de poussières) ou une altération du processus de transduction (par exemple une perte d'efficacité d'un générateur à coupes ou à pales par suite d'une usure des balais) peuvent provoquer une modification des caractéristiques de l'instrument et entraîner une dégradation de la qualité des données anémométriques.

L'inspection de tracés analogues permettra de déceler d'éventuelles anomalies, mises en évidence par un zéro incorrect, un tracé «en escalier» dû au frottement, un bruit anormal (souvent perceptible aux faibles vitesses du vent), une sensibilité médiocre (aux faibles vitesses) et une variabilité irrégulière ou réduite du vent enregistré.

Lors de l'inspection, il convient de rechercher un éventuel endommagement matériel en contrôlant le zéro des anémomètres (on immobilise pour cela les coupes ou l'hélice) ainsi que l'orientation des girouettes (on les immobilise alors dans une ou des positions prédéterminées). Les instruments ne peuvent être d'ordinaire réparés qu'en atelier.

Les composants électriques et électroniques des instruments d'enregistrement ou de télémesure devraient être régulièrement inspectés. Il convient en particulier de contrôler le zéro et la plage de fonctionnement de tous les dispositifs servant à mesurer la vitesse et la direction du vent.

ANNEXE

LONGUEUR DE RUGOSITÉ EFFICACE

En vue de la correction liée à l'exposition, il est nécessaire de définir, en fonction de la direction du vent, une longueur de rugosité z_0 qui soit représentative des 2 km de fetch amont. La qualité de la correction des effets de la rugosité est en grande partie subordonnée à l'exactitude de cette longueur de rugosité.

En mer, la tâche est relativement simple du fait de l'uniformité du fetch. Il est possible d'appliquer la relation dite de Charnock, qui permet d'exprimer la rugosité surfacique de la mer en fonction de la vitesse de frottement u^* et de l'accélération de la pesanteur g à l'aide de la formule $z_{0u} = \alpha u^{*2}/g$, où α est une constante empirique approximativement égale à 0,014. La vitesse de frottement est liée au profil de vent neutre par la formule $U(z) = (u^*/\kappa) \ln(z/z_{0u})$ où κ est la constante de Von Karman (0,4) et z , la hauteur d'observation. Ces deux équations doivent être résolues par itération, ce qui peut être réalisé en commençant avec $z_{0u} = 0,0001$, puis en calculant u^* à partir du profil logarithmique, en évaluant de nouveau z_{0u} et en répétant l'opération un petit nombre de fois.

Sur la terre ferme, la longueur de rugosité en surface, qui dépend du couvert superficiel et du mode d'utilisation des sols, est par conséquent difficile à estimer. Une façon subjective de déterminer z_{0u} consiste à effectuer un relevé du terrain autour de la station anémométrique grâce aux indications du tableau ci-dessous dont la validité a été récemment corroborée (Davenport and others, 2000). Le plus commode est de délimiter des secteurs de direction du vent de 30° sur une distance de 2 km. Lorsque les conditions de fetch sont très hétérogènes, on définit une rugosité efficace en faisant la moyenne des diverses valeurs de $\ln(z_{0u})$, plutôt que de z_{0u} elle-même.

La meilleure façon de déterminer la valeur de z_{0u} consiste à tirer parti de la climatologie des écarts types sur une période d'une année environ. Les écarts types de la vitesse et de la direction du vent étant liés à la rugosité en amont sur une distance de quelques kilomètres, on peut les utiliser pour obtenir une estimation objective de z_{0u} . Connaissant su, l'écart type de la vitesse du vent, et s_d , l'écart type de la direction du vent (en radians), il est possible d'utiliser les formules suivantes :

$$s_u/U = c_u \kappa [\ln(z/z_{0u})]^{-1} \quad A.1$$

$$s_d/U = c_v \kappa [\ln(z/z_{0u})]^{-1} \quad A.2$$

où $c_u = 2,2$, $c_v = 1,9$ et $\kappa = 0,4$ pour des mesures non filtrées de s_u et s_d . Dans le cas des systèmes de mesure

décris à la section 5.8.3, l'écart type de la vitesse du vent est filtré d'environ 12 pour cent et celui de la direction du vent, d'environ 2 pour cent, ce qui implique des valeurs moindres de c_u et c_v , s'établissant respectivement à 1,94 et 1,86. Pour pouvoir appliquer les équations ci-dessus, il est nécessaire de choisir des situations de vent fort ($U > 4 \text{ m s}^{-1}$) et de faire la moyenne de σ_u/U et/ou de σ_d en utilisant toutes les données disponibles, et cela par secteur de direction du vent (30° par secteur) et par saison (la rugosité de surface est par exemple fonction de la densité du feuillage des arbres). Les valeurs de z_{0u} peuvent être alors déterminées à l'aide des équations ci-dessus, la comparaison des résultats obtenus à partir de σ_u et de σ_d donnant quelque idée de l'exactitude atteinte.

Dans le cas où aucune information sur l'écart type n'est disponible, mais que les rafales maximales pour période de calcul de la vitesse moyenne du vent (10 mn ou 1 heure) sont déterminées, les rapports des rafales maximales aux moyennes relatives aux mêmes périodes (facteurs de rafales) peuvent être utilisés pour déterminer z_{0u} (Verkaik, 2000). La connaissance de la dynamique des systèmes à savoir la longueur de réponse du capteur et le temps de réponse de la chaîne d'enregistrement sont nécessaires pour cette approche.

Classification des terrains selon la longueur de rugosité aérodynamique z_0 d'après Davenport (1960) (adapté par Wieringa, 1980)

Catégorie	Brève description du terrain	z_0 (m)
1	Pleine mer, fetch d'au moins 5 km	0,0002
2	Vasières, terrain enneigé ; ni végétation, ni obstacle	0,005
3	Terrain plat et dégagé ; herbe, quelques obstacles isolés	0,03
4	Cultures basses ; gros obstacles occasionnels, $x/H > 20$	0,10
5	Cultures hautes ; obstacles dispersés, $15 < x/H < 20$	0,25
6	Bois, broussailles ; nombreux obstacles, $x/H \approx 10$	0,5
7	Gros obstacles régulièrement répartis (banlieues, forêts)	1,0
8	Agglomérations comprenant des bâtiments de diverses hauteurs	≥ 2

- Note : x est la distance type jusqu'aux obstacles au vent et H , la hauteur des principaux obstacles correspondants. Pour plus de détails et une mise à jour des descriptions des catégories de terrains voir (Davenport and others, 2000) et également le tableau 11.2, chapitre 11, partie II.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Ackermann, G.R., 1983 : Means and standard deviations of horizontal wind components. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, pp. 959–961.
- Albers, A., H. Klug and D. Westermann, 2000 : Outdoor Comparison of Cup Anemometers. *DEWI Magazin*, No. 17, August 2000.
- Beljaars, A.C.M., 1987 : The influence of sampling and filtering on measured wind gusts. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4, pp. 613–626.
- Busch, N.E. and L. Kristensen, 1976 : Cup anemometer overspeeding. *Journal of Applied Meteorology*, 15, pp. 1328–1332.
- Coppin, P.A., 1982 : An examination of cup anemometer overspeeding. *Meteorologische Rundschau*, 35, pp. 1–11.
- Curran, J.C., G.E. Peckham, D. Smith, A.S. Thom, J.S.G. McCulloch and I.C. Strangeways, 1977 : Cairngorm summit automatic weather station. *Weather*, 32, pp. 60–63.
- Davenport, A.G., 1960 : Rationale for determining design wind velocities. *Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers*, 86, pp. 39–68.
- Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke and J.Wieringa, 2000 : Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Preprints of the Twelfth American Meteorological Society Conference on Applied Climatology* (Asheville, NC , United States), pp. 96–99.
- Evans, R.A. and B.E. Lee, 1981 : The problem of anemometer exposure in urban areas: a wind-tunnel study. *Meteorological Magazine*, 110, pp. 188–189.
- Frenkiel, F.N., 1951 : Frequency distributions of velocities in turbulent flow. *Journal of Meteorology*, 8, pp. 316–320.
- Gill, G.C., L.E. Olsson, J. Sela and M. Suda, 1967 : Accuracy of wind measurements on towers or stacks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 48, pp. 665–674.
- Gold, E., 1936 : Wind in Britain – The Dines and some notable records during the last 40 years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 62, pp. 167–206.
- Grimmond, C.S.B., T.S. King, M. Roth and T.R. Oke, 1998 : Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. *Boundary Layer Meteorology*, 89, pp. 1–24.
- Kaimal, J.C., 1980 : Sonic anemometers. *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds), Plenum Press, New York, pp. 81–96.
- Lenschow, D.H. (ed.), 1986 : *Probing the Atmospheric Boundary Layer*. American Meteorological Society, Boston.
- MacCready, P.B., 1966 : Mean wind speed measurements in turbulence. *Journal of Applied Meteorology*, 5, pp. 219–225.
- MacCready, P.B. and H.R. Jex, 1964 : Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 3, pp. 182–193.
- Makinwa, K.A.A., J.H. Huijsing and A. Hagedoorn, 2001 : Industrial design of a solid-state wind sensor. *Proceedings of the First ISA/IEEE Conference*, Houston, November 2001, pp. 68–71.
- Mazzarella, D.A., 1972 : An inventory of specifications for wind-measuring instruments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, pp. 860–871.
- Mollo-Christensen, E. and J.R. Seesholtz, 1967 : Wind tunnel measurements of the wind disturbance field of a model of the Buzzards Bay Entrance Light Tower. *Journal of Geophysical Research*, 72, pp. 3549–3556.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1990 : Commission des instruments et des méthodes d'observation. Rapport final abrégé de la dixième session. OMM n° 727. Genève.
- Patterson, J., 1926 : The cup anemometer. *Transactions of the Royal Society of Canada*, 20, Series III, pp. 1–54.
- Smith, S.D., 1980 : Dynamic anemometers. *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.). Plenum Press, New York, pp. 65–80.
- Taylor, P.A. and R.J. Lee, 1984 : Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features. *Climatological Bulletin, Canadian Meteorological and Oceanographic Society*, 18, pp. 3–22.
- Van Oudheusden, B.W. and J.H. Huijsing, 1991 : Microelectronic thermal anemometer for the measurement of surface wind. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 8, pp. 374–384.
- Verkaik, J.W., 2000 : Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 39, pp. 1613–1626.
- Walmsley, J.L., I.B. Troen, D.P. Lalas and P.J. Mason, 1990 : Surface-layer flow in complex terrain: Comparison of models and full-scale observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 52, pp. 259–281.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Wieringa, J., 1967 : Evaluation and design of wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 6, pp. 1114–1122.
- Wieringa, J., 1980a : A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorology*, 18, pp. 411–430.
- Wieringa, J., 1980b : Representativeness of wind observations at airports. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61, pp. 962–971.
- Wieringa, J., 1983 : Description requirements for assessment of non-ideal wind stations, for example Aachen. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11, pp. 121–131.
- Wieringa, J., 1986 : Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, pp. 867–889.
- Wieringa, J., 1996 : Does representative wind information exist? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 65, pp. 1–12.
- Wieringa, J. and F.X.C.M. van Lindert, 1971 : Application limits of double-fin and coupled wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 10, pp. 137–145.
- World Meteorological Organization, 1981 : *Review of Reference Height for and Averaging Time of Surface Wind Measurements at Sea* (F.W. Dobson). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 3, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1984a : *Compendium of Lecture Notes for Training Class IV Meteorological Personnel* (B.J. Retallack). Volume II – Meteorology (second edition), WMO-No. 266, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1984b : Distortion of the wind field by the Cabauw Meteorological Tower (H.R.A. Wessels). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO)*, Instruments and Observing Methods Report No. 15, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1987 : *The Measurement of Gustiness at Routine Wind Stations: A Review* (A.C.M. Beljaars). Instruments and Observing Methods Report No. 31, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1989 : *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (R.J. Shearman and A.A. Zelenko). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 22, WMO/TD-No 311, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1990 : *Abridged Final Report of the Tenth Session of the Commission for Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 727, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1991 : *Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data* (D. Painting). Report of the CIMO Working Group on Surface Measurements, Instruments and Observing Methods Report No. 47, WMO/TD-No. 452, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1995 : *Manual on Codes*. Volume I.1, WMO-No. 306, Geneva.
- World Meteorological Organization, 2000 : Wind measurements: Potential wind speed derived from wind speed fluctuations measurements, and the representativity of wind stations (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*, Instruments and Observing Methods Report No. 74, WMO/TD-No. 1028, p. 72, Geneva.
- World Meteorological Organization, 2001 : Lecture notes for training agricultural meteorological personnel (second edition; J. Wieringa and J. Lomas). WMO-No. 551, Geneva (sections 5.3.3 and 9.2.4).
- Wyngaard, J.C., 1981 : The effects of probe-induced flow distortion on atmospheric turbulence measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 20, pp. 784–794.

CHAPITRE 6

MESURE DES PRÉCIPITATIONS

1.1 GÉNÉRALITÉS

Le présent chapitre décrit les méthodes connues utilisées pour la mesure des précipitations dans les stations de surface. Il ne traite pas des mesures destinées à définir la structure et le caractère des précipitations ni celles qui requièrent des instruments spécialisés ou qui ne constituent pas des observations météorologiques standards (par exemple, la répartition des gouttes en fonction de leurs dimensions). Les mesures effectuées au moyen de radars et de satellites et les mesures en mer font l'objet de la partie II de ce guide.

Des informations sur la mesure des précipitations incluant, en particulier, plus de détails sur la mesure du couvert neigeux peuvent aussi être trouvées dans (WMO, 1992a ; 1998).

Le problème général de la représentativité des mesures se pose tout particulièrement dans le cas de la mesure des précipitations. Pour cette mesure, les éléments particulièrement sensibles sont l'exposition, le vent et la topographie. Les métadonnées décrivant les circonstances dans lesquelles ont été obtenues les mesures sont donc particulièrement utiles pour les utilisateurs des données.

Au moment de la planification des réseaux, une attention toute particulière devrait être accordée au fait que l'analyse des données pluviométriques est grandement simplifiée et plus fiable si un seul type de pluviomètre est utilisé et si les critères appliqués pour la sélection des sites sont similaires.

6.1.1 Définitions

Par définition, les précipitations sont les produits solides ou liquides résultant de la condensation de la vapeur d'eau qui tombent des nuages ou qui passent directement de l'air au sol sur lequel ils se déposent. Elles comprennent la pluie, la grêle, la neige, la rosée, le givre, la gelée blanche et les précipitations de brouillard. La quantité totale de précipitations atteignant le sol est représentée en termes de profondeur verticale d'eau (ou d'équivalent en eau dans le cas des formes solides) qu'elle aurait si elle couvrait une projection horizontale de la surface du sol. Les chutes de neige sont également représentées par l'épaisseur de la neige fraîche couvrant une surface horizontale uniforme (voir section 6.7).

6.1.2 Unités et échelles

L'unité de précipitation est une mesure linéaire de la hauteur, habituellement exprimée en millimètres (volume/surface), ou kg m^{-2} (masse/surface) pour les précipitations liquides. Les quantités quotidiennes de précipitations devraient être lues à 0,2 mm et, si possible, à 0,1 mm près ; les quantités hebdomadaires et mensuelles devraient être lues à 1 mm près (au moins). Les mesures quotidiennes devraient être effectuées à heures fixes communes à tout le réseau ou aux réseaux présentant un intérêt. Les quantités inférieures à 0,1 mm (0,2 mm aux États Unis) sont généralement appelées traces. L'intensité de la précipitation est également exprimée sous la forme d'une mesure linéaire par unité de temps, habituellement des millimètres par heure.

Les mesures des chutes de neige sont exprimées en centimètres et en dixièmes, au cinquième de centimètre le plus proche. Une hauteur de neige inférieure à 0,2 cm est habituellement appelée une trace. La hauteur de neige au sol est généralement mesurée quotidiennement en centimètres entiers.

6.1.3 Besoins dans les domaines de la météorologie et de l'hydrologie

L'annexe 1.B du chapitre 1 de la partie I indique dans les grandes lignes les besoins en matière d'exactitude, de calibre et de résolution pour la mesure des précipitations et donne un chiffre de cinq pour cent comme exactitude atteignable (au niveau de confiance de 95 pour cent).

Les observations courantes se font toutes les heures, toutes les trois heures et tous les jours, à des fins synoptiques et climatologiques. Dans certains cas, il est nécessaire d'effectuer des observations plus fréquentes pour mesurer des précipitations de très forte intensité sur de très brèves périodes. Dans le cadre de certaines applications, des pluviomètres totalisateurs sont utilisés à des intervalles d'observation de plusieurs semaines ou plusieurs mois, voire une année dans les zones de montagne ou les déserts.

6.1.4 Méthodes de mesure

6.1.4.1 Instruments

Les capteurs de précipitations (ou pluviomètres si seules les précipitations liquides sont mesurées) sont

les instruments le plus couramment utilisés pour mesurer les précipitations. On utilise généralement un collecteur ouvert à parois verticales ayant habituellement la forme d'un cylindre droit auquel est adjoint un entonnoir lorsque l'objectif principal est la mesure de la pluie. Comme des collecteurs de formes et de dimensions diverses avec des hauteurs d'installation pouvant différer d'un pays à l'autre sont utilisés, les mesures obtenues ne sont pas strictement comparables (WMO, 1989a). On mesure le volume ou le poids des précipitations captées, ce dernier notamment pour les précipitations solides. L'ouverture du pluviomètre peut être soit à l'une des nombreuses hauteurs spécifiées au-dessus du sol, soit au niveau du sol. Elle doit être placée au-dessus de la hauteur maximale prévue du manteau neigeux et au-dessus de la hauteur des éventuels rejaillissements sur le sol susceptibles de provoquer des erreurs significatives. Pour la mesure des précipitations solides, l'ouverture doit être au-dessus du sol et entourée d'un écran artificiel. Les hauteurs d'orifice les plus couramment utilisées dans plus de 100 pays varient entre 0,5 et 1,5 m (WMO, 1989a).

La mesure des précipitations est extrêmement sensible à l'exposition et notamment au vent. L'exposition est abordée à la section 6.2. La section 6.4 traite en détail les erreurs auxquelles sont sujets les capteurs de précipitations ainsi que les corrections qui peuvent être appliquées.

Ce chapitre décrit également plusieurs techniques spéciales utilisées pour la mesure d'autres types de précipitations (rosée, givre et autres.) ainsi que du manteau neigeux. Certaines techniques nouvelles qui font leur apparition en usage opérationnel ne sont pas décrites ici : c'est le cas du pluviomètre optique, qui fait appel à la diffusion optique. Pour plus d'informations sur les nouvelles méthodes actuellement mises au point, on peut utilement se référer aux rapports de conférences périodiques telles que les ateliers internationaux sur la mesure des précipitations (Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993 et WMO, 1989b) et les conférences organisées par la Commission des instruments et des méthodes d'observation (WMO, 1998).

Les mesures ponctuelles de précipitations sont la première source de données pour l'analyse surfacique. Toutefois, même la meilleure mesure de précipitations en un point n'est représentative que d'une zone limitée dont la dimension est une fonction de la longueur de la période d'accumulation, de l'homogénéité physiographique de la région, de la topographie locale et du processus produisant les précipitations. Les radars, et plus récemment les satellites, sont utilisés pour définir

et quantifier la répartition spatiale des précipitations. Ces techniques sont décrites dans la Partie II de ce Guide. En principe on peut compter obtenir dans la pratique des estimations des précipitations surfaciques suffisamment précises pour une large gamme d'utilisateurs des données pluviométriques en réalisant une bonne intégration des trois sources de données de précipitations surfaciques (pluviomètres automatiques, radars et satellites) dans les réseaux nationaux de mesure des précipitations.

Des instruments qui détectent les précipitations et en identifient le type, ce qui ne signifie pas qu'ils les mesurent, peuvent être utilisés comme détecteurs du temps présent ; cette question est traitée au chapitre 14 de la Partie I.

6.1.4.2 Capteurs de référence et intercomparaisons

Les instruments de référence utilisés sont de plusieurs types. Leur caractéristique essentielle est le fait qu'ils atténuent ou contrôlent l'effet du vent sur la pluie recueillie, cet effet constituant la principale cause de différence entre les pluviomètres. Ils sont également choisis de manière à atténuer les autres erreurs dont il est question à la section 6.4 ci-après.

Pour la mesure des précipitations liquides, les instruments de référence utilisés sont des pluviomètres placés au niveau du sol. Étant donné qu'ils ne sont pas sujets à des erreurs induites par le vent, ils donnent généralement des résultats supérieurs à ceux des pluviomètres surélevés (WMO, 1984). Ces instruments sont placés dans une fosse avec la bague du pluviomètre au niveau du sol et à une distance suffisante du bord le plus proche de la fosse pour éviter les rejaillissements. La fosse devrait être recouverte d'une solide grille anti-éclaboussures, faite de métal ou de matière plastique et dotée d'une ouverture centrale pour le pluviomètre. Des dispositions devraient être prises pour assurer le drainage de la fosse. Des schémas de fosses de mesure sont donnés dans (WMO, 1984).

Pour les précipitations solides, l'instrument de référence est l'instrument connu sous le nom d'instrument de référence et de comparaison à double barrière. C'est un instrument doté de doubles barrières verticales octogonales entourant un capteur de Tretyakov qui, pour sa part, a une forme particulière d'écran déflecteur. On peut trouver des schémas et une description de cet instrument dans (Goodison, Sevruk and Klemm, 1989), dans (WMO, 1985) ainsi que dans le rapport final de la Comparaison OMM des mesures des précipitations solides (WMO, 1998).

L'annexe 6A contient des recommandations concernant les comparaisons de pluviomètres par rapport aux instruments de référence¹.

6.1.4.3 Documentation

La mesure des précipitations est particulièrement sensible à l'exposition des pluviomètres de sorte qu'il est important d'enregistrer méticuleusement les métadonnées concernant les mesures afin de réunir un historique complet de la station qui servira aux études climatiques et autres études ainsi que pour l'assurance qualité.

La section 6.2 traite des informations à conserver concernant le site : descriptions détaillées du site, y compris les angles des obstacles importants entourant le capteur par rapport à la verticale, la configuration de l'instrument, la hauteur de son ouverture au-dessus du sol et la hauteur de l'instrument de mesure de la vitesse du vent par rapport au sol.

Les changements dans les techniques d'observation des précipitations, essentiellement l'utilisation de différents types de pluviomètres, la modification du site ou de la hauteur d'installation, peuvent causer des inhomogénéités dans les séries temporelles de précipitation (voir le chapitre 2 de la partie III). L'utilisation de types de pluviomètres et d'expositions de site différents conduit à des inhomogénéités spatiales. Ceci est dû aux erreurs systématiques des mesures de précipitation, essentiellement celles liées au vent. Alors que les techniques statistiques de correction peuvent éliminer les inhomogénéités relatives aux pluviomètres environnants, les corrections des erreurs dues à l'effet du vent peuvent à leur tour éliminer le biais des valeurs mesurées pour tous les types de pluviomètres.

Dans les sections ci-après concernant les différents types d'instruments (notamment dans la section 6.4), il est question des corrections qui peuvent être apportées aux mesures des précipitations. Ces corrections sont entachées d'incertitudes et il faudrait conserver les relevés originaux et les formules de correction.

Toute modification des méthodes d'observation devrait également être notée.

6.2 EMPLACEMENT ET EXPOSITION

Toutes les méthodes de mesure des précipitations devraient viser à obtenir un échantillon représentatif de la quantité réelle de précipitations tombant sur la zone que la mesure doit représenter à l'échelle synoptique, à une méso-échelle ou une micro-échelle. Le choix du site et l'erreur systématique de mesure associée sont donc importants. Pour des précisions sur les effets dus au choix du site voir (Sevruk and Zahlavova, 1994).

La distribution des stations pluviométriques à l'intérieur d'une zone donnée est un critère important, car c'est du nombre et de la répartition géographique des pluviomètres que dépend la représentativité des mesures par rapport à la quantité des précipitations réellement tombée sur cette zone. On trouvera de plus amples renseignements sur ce sujet dans le document (WMO, 1992b) en ce qui concerne la pluie et la neige. La publication OMM-n° 168 (OMM, 1996) donne une introduction à la documentation concernant le calcul des précipitations surfaciques et les corrections relatives à la topographie.

Les effets de l'environnement immédiat du site sur le champ de vent peuvent être à l'origine d'anomalies locales, positives ou négatives, dans la quantité des précipitations reçues. D'une manière générale, aucun objet ne devrait être à une distance du pluviomètre inférieure à deux fois sa hauteur au-dessus de l'ouverture de celui-ci. Pour chaque site, l'angle moyen par rapport à la verticale des obstacles devrait être estimé et un plan du site dressé. Les sites sur une pente ou sur un toit devraient être évités. Pour le mesurage des chutes de neige et/ou du manteau neigeux, les sites retenus devraient, autant que possible, être situés dans des zones abritées du vent. Les meilleurs sites se situent souvent dans des clairières à l'intérieur des forêts ou des vergers, au milieu d'arbres ou d'arbustes, ou dans des endroits où des objets d'une autre nature jouent un rôle de brise-vent pour toutes les directions.

Il est toutefois préférable de réduire les effets du vent et ceux exercés par le site sur le vent en utilisant un pluviomètre enterré pour la mesure des précipitations liquides ou en assurant l'horizontalité de l'écoulement de l'air au-dessus de l'orifice du capteur, et en adoptant l'une des techniques suivantes, données par ordre décroissant d'efficacité :

- (a) dans les zones à végétation dense et homogène, maintenir par des tontes régulières la hauteur de la végétation au même niveau que l'ouverture du pluviomètre ;
- (b) dans les autres zones, renforcer l'effet des interventions mentionnées en a) par l'emploi de palissades judicieusement disposées ;
- (c) installer des écrans autour du pluviomètre.

Le sol autour du pluviomètre peut être recouvert de gazon, de gravier ou de galets, mais les surfaces

¹ Recommandées par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa onzième session (1994).

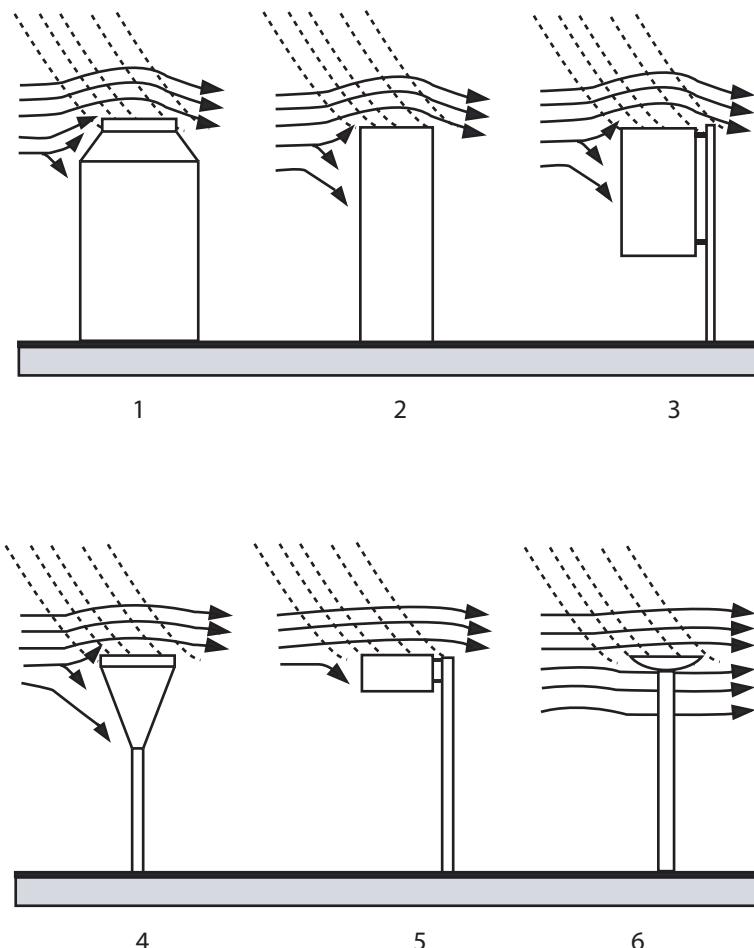


Figure 6.1. Différentes formes de pluviomètres standards. Les lignes continues représentent les lignes de courant et les pointillés les trajectoires des particules des précipitations. Une grande déformation du champ de vent est produite au-dessus de l'orifice du premier pluviomètre, alors que l'effet est plus faible pour le dernier capteur. Il en résulte que l'erreur due au vent est plus grande pour le premier pluviomètre que pour le dernier (Sevruk ans Nespor, 1994).

plates et dures comme les surfaces en béton devraient être éliminées pour éviter les entrées d'eau par rejaillissement.

6.3 PLUVIOMÈTRES NON ENREGISTREURS

6.3.1 Capteurs ordinaires

6.3.1.1 Instruments

Le pluviomètre le plus commun revêt la forme d'un collecteur placé au-dessus d'un entonnoir aboutissant dans un récipient où sont stockées l'eau et la neige fondues accumulées entre les heures d'observation. Différentes formes de pluviomètres (figure 1) sont utilisées à travers le monde. Là où les précipitations solides sont fréquentes et abondantes, on apporte généralement au pluviomètre un cer-

tain nombre de modifications destinées à améliorer l'exactitude des mesures. Il s'agit notamment de la suppression de l'entonnoir du pluviomètre au début de la saison des neiges ou de l'ajout d'une barrière anti-neige spéciale (WMO, 1998) qui empêche le vent de chasser hors du bac la neige déjà collectée. L'installation d'écrans contre le vent autour du pluviomètre permet de réduire l'erreur provoquée par la déformation du champ de vent au-dessus de l'instrument et par de la neige soufflée dans le capteur. Leur utilisation est conseillée pour la mesure de la pluie et elle est essentielle pour celle de la neige. Les capteurs employés sont de type très variable (voir WMO, 1989a).

L'eau stockée est collectée dans récipient gradué ou versée du collecteur dans une éprouvette graduée ; son niveau dans le collecteur peut aussi être directement mesuré à l'aide d'une réglette graduée. Pour les précipitations liquides, la dimension du collecteur

n'est pas critique, mais, si des précipitations solides sont susceptibles de se produire en quantités significatives, une surface d'au moins 200 cm^2 est nécessaire. Une surface comprise entre 200 et 500 cm^2 est généralement considérée comme la plus satisfaisante. Il est particulièrement impératif qu'un pluviomètre possède les caractéristiques suivantes :

- (a) la bague du collecteur devrait avoir une arête tranchante tombant verticalement à l'intérieur et formant à l'extérieur un biseau prononcé. Les nivomètres devraient être conçus de manière à éviter une réduction importante de la surface réceptrice par accumulation de neige mouillée autour de la bague du collecteur ;
- (b) la surface réceptrice devrait être connue à au moins $0,5$ pour cent près et l'ensemble de l'instrument devrait être réalisé de manière qu'elle demeure constante pour des utilisations normales de l'appareil ;
- (c) le collecteur devrait être conçu de manière que les rejaillissements ne fassent ni entrer ni sortir d'eau du pluviomètre. Ceci peut être obtenu au moyen d'une paroi verticale suffisamment profonde et en donnant à la paroi de l'entonnoir une pente suffisamment accusée (au moins 45°). La figure 2 donne le schéma de deux configurations satisfaisantes ;
- (d) la conception devrait viser à minimiser les erreurs dues au mouillage ;
- (e) pour minimiser les pertes par évaporation, le récipient devrait avoir une entrée de surface réduite et être suffisamment protégé du rayonnement. Les pluviomètres destinés à être utilisés dans des endroits où leur relevé ne pourra s'effectuer qu'hebdomadairement ou mensuellement seront conçus d'une manière identique à ceux utilisés pour les mesurages quotidiens, mais seront pourvus d'un seau plus robuste et de capacité plus grande.

Les éprouvettes devraient être en verre ou en matière plastique transparente ayant un coefficient de

dilatation thermique approprié et elles devraient porter, d'une manière bien visible, une indication de la dimension ou du type du pluviomètre avec lequel elles doivent être utilisées. Leur diamètre devrait être inférieur d'au moins un tiers à celui de la bague du pluviomètre, l'exactitude de la mesure étant d'autant plus grande que le rapport entre ces deux diamètres est petit. Les graduations devraient être finement gravées avec, en général, un trait tous les $0,2 \text{ mm}$ et une ligne clairement numérotée tous les millimètres entiers. Il est également souhaitable d'indiquer la ligne correspondant à $0,1 \text{ mm}$. L'erreur maximale sur les graduations ne devrait pas excéder $\pm 0,05 \text{ mm}$ pour les valeurs égales ou supérieures à 2 mm et $\pm 0,02 \text{ mm}$ pour les valeurs en dessous de 2 mm .

Pour assurer la mesure des faibles précipitations avec une bonne exactitude, le diamètre interne de l'éprouvette devrait se réduire progressivement au bas de celle-ci. Pour toutes les mesures, le fond du ménisque formé par l'eau devrait être pris comme niveau de référence et l'éprouvette devrait être maintenue verticale pendant la lecture de manière à éviter les erreurs de parallaxe. La répétition des graduations principales au dos de l'éprouvette limite également ce type d'erreur.

Les règles graduées devraient être en bois de cèdre ou en tout autre matériau qui n'absorbe pas l'eau d'une manière appréciable et qui ne donne pas naissance à des phénomènes de capillarité importants. Si de l'huile a été employée pour contrecarrer l'évaporation, les règles de bois ne sont pas utilisables. Dans ce cas, il convient d'utiliser des règles en métal ou en tout autre matériau facilement nettoyable. Les règles non métalliques devraient être munies d'une extrémité en cuivre destinée à en prévenir l'usure. Elles devraient être graduées en fonction des surfaces relatives des sections droites respectives de la bague et du récipient du pluviomètre et en tenant compte du volume de liquide déplacé par l'immersion de la règle. Elles devraient porter des graduations au moins tous les 10 mm . L'erreur maximale sur les graduations d'une règle ne devrait en aucun point excéder $\pm 0,5 \text{ mm}$. Une mesure effectuée au moyen d'une règle devrait, chaque fois qu'il est possible de le faire, être contrôlée par un mesurage volumétrique.

6.3.1.2 Procédure

L'éprouvette doit être tenue en position verticale lors de la lecture et l'observateur doit être conscient du risque d'erreur de parallaxe. La neige collectée au moyen de pluviomètres non enregistreurs devrait être soit pesée, soit fondu immédiatement après chaque observation, la quantité d'eau produite par sa fonte étant alors mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée ordinaire. On peut également mesurer

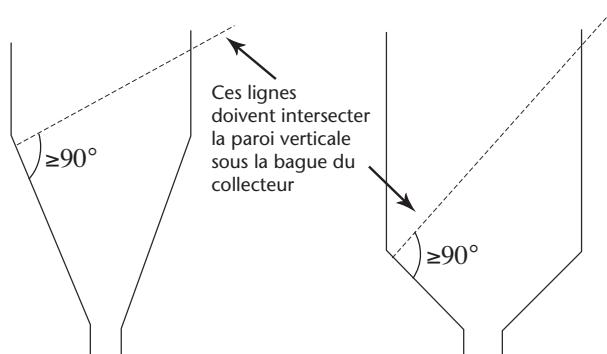


Figure 6.2.
Configurations satisfaisantes pour les pluviomètres.

les précipitations en effectuant une pesée exacte de l'eau recueillie; on détermine d'abord le poids total du contenu et du récipient, puis on soustrait le poids connu de celui-ci. Cette méthode a plusieurs avantages; elle élimine, en particulier, le risque de renverser une partie de l'eau recueillie et elle inclut dans le poids mesuré toute l'eau qui adhère au récipient. Les méthodes les plus couramment utilisées sont cependant plus simples et moins coûteuses.

6.3.1.3 Étalonnage et maintenance

Les graduations de l'éprouvette ou de la règle utilisée pour les mesures doivent, naturellement être adaptées à la surface du collecteur. L'étalonnage du pluviomètre comprend donc la vérification du diamètre de l'ouverture du capteur en s'assurant qu'il reste dans les limites de tolérance autorisées. Il comprend également des vérifications volumétriques de l'éprouvette ou de la règle.

La maintenance courante devrait comprendre le maintien constant du niveau de l'instrument : en ce qui concerne l'effet d'un pluviomètre dont le niveau est décalé, se reporter à Rinehart (1983) et Sevruk (1984). Selon les besoins, l'enveloppe extérieure du pluviomètre doit être maintenue propre, à l'intérieur et à l'extérieur, et il en va de même pour la partie graduée, notamment à l'intérieur. Pour ce faire, on utilise une brosse à long manche et de l'eau savonneuse et l'on rince à l'eau claire. Les pièces usées, endommagées ou cassées devraient être remplacées selon les besoins. La végétation entourant le capteur devrait être rabattue à 5 cm (le cas échéant). L'exposition devrait être vérifiée et notée.

6.3.2 Pluviomètres totalisateurs

Les pluviomètres totalisateurs sont utilisés pour mesurer la totalité des précipitations ayant affecté, pendant une saison, une région éloignée ou peu peuplée. Ces appareils comprennent un collecteur au-dessus d'un entonnoir aboutissant dans un récipient suffisamment grand pour stocker la totalité des précipitations recueillies au cours d'une saison (ou d'un mois dans les zones à précipitations importantes). Pour réduire l'évaporation, une huile appropriée ou tout autre agent éliminant l'évaporation devrait être versé dans le récipient de manière à former une couche d'eau moins 5 mm (WMO, 1972). Celle-ci devrait permettre aux précipitations d'atteindre sans difficulté la solution qu'elle recouvre.

Une solution d'antigel peut être placée dans le récipient pour assurer la fonte de la neige qu'il collecte. Il est important que cette solution reste homogène. Un mélange de 37,5 pour cent en poids de chlorure de calcium commercial (pureté 78 pour cent) et de 62,5 pour cent d'eau donne des résultats satis-

faisants. Des solutions aqueuses de glycol éthylène ou des mélanges de glycol éthylène et de méthanol peuvent également être utilisés. Ces dernières solutions sont plus coûteuses mais moins corrosives que le chlorure de calcium ; de plus, elles assurent une meilleure protection contre le gel lorsque la dilution devient plus grande sous l'action des pluies captées par le pluviomètre. Le volume de la solution mise dans le récipient au début d'une période de mesure ne devrait pas excéder 33 pour cent du volume total de celui-ci.

Dans certains pays, cette solution d'antigel et d'huile est considérée comme déchet toxique et donc nuisible pour l'environnement. Il conviendrait d'obtenir les directives concernant le rejet des substances toxiques auprès des autorités locales de protection de l'environnement.

On détermine la quantité des précipitations recueillies pendant la saison considérée en pesant ou mesurant le volume du contenu du récipient (comme pour les pluviomètres ordinaires, voir section 6.3.1). Il faut tenir dûment compte du volume d'huile ou de solution d'antigel mis dans le récipient au début de la saison et, dans le cas d'une mesure volumétrique, de toute rétraction que celle-ci aurait pu subir. Des corrections peuvent être appliquées comme pour les pluviomètres ordinaires.

L'exploitation et la maintenance des pluviomètres totalisateurs dans les endroits reculés posent un certain nombre de problèmes, liés par exemple à la possibilité que la neige recouvre l'instrument ou à la difficulté de trouver un site convenable, qui sont à résoudre cas par cas. Il convient d'accorder une attention particulière à l'évaluation de la qualité des données fournies par ce type d'équipement.

6.4 ERREURS ET CORRECTIONS S'APPLIQUANT AUX PLUVIOMÈTRES

A ce stade, il convient de traiter les erreurs et les corrections qui s'appliquent, dans une certaine mesure, à la plupart des pluviomètres, qu'ils soient totalisateurs ou non enregistreurs. Les cas particuliers relatifs aux pluviomètres totalisateurs sont traités à la section 6.5.

On trouvera un compte rendu complet des erreurs et des corrections dans les publications OMM (WMO, 1982 ; WMO, 1984 ; WMO, 1986 et, pour la neige en particulier, WMO, 1998). La publication (WMO, 1982) donne des détails sur les modèles couramment utilisés pour l'ajustement des données brutes de précipitations au Canada, au Danemark, en Finlande,

en Suisse, en Russie et aux États Unis d'Amérique. (WMO, 1989a) donne une description de la manière dont se produisent les erreurs. Des documents de conférences sur ce sujet sont réunis dans les publications OMM (WMO, 1986 ; WMO, 1989b).

La quantité de précipitations mesurée par les pluviomètres usuels peut être inférieure jusqu'à 30 pour cent ou plus à celle de la précipitation ayant atteint réellement le sol. Les pertes systématiques varieront selon le type de précipitations (neige, neige et pluie mêlées et pluie). Dans la mesure des précipitations solides, l'erreur systématique est habituellement importante et peut aller jusqu'à excéder d'un ordre de grandeur celle dont souffrent ordinairement les mesures des précipitations liquides.

Pour en tenir compte, il est nécessaire, à de nombreuses fins hydrologiques, de procéder avant tout calcul à un ajustement des données. Il va sans dire que ces ajustements ne peuvent pas être exacts (ils aggravent même parfois l'écart initial). On devrait donc toujours conserver les données originales comme archive de base, d'abord en vue de garantir la continuité des relevés, ensuite parce qu'elles constitueront le meilleur jeu de référence exploitable pour parfaire les ajustements le jour où cela apparaîtra possible.

En bref, la quantité réelle de précipitations peut être estimée en appliquant des corrections pour quelques-uns ou pour l'ensemble des termes constitutifs de l'erreur dont la liste figure ci-dessous :

- (a) erreur due à la déformation du champ de vent au-dessus de la surface réceptrice du pluviomètre : généralement de deux à 10 pour cent pour la pluie et de 10 à 50 pour cent pour la neige ;
- (b) erreur due aux pertes par mouillage des parois internes du collecteur ;
- (c) erreur due aux pertes par mouillage du récipient quand on vide celui-ci : généralement de 2 à 15 pour cent en été et de 1 à 8 pour cent en hiver, pour b) et c) pris ensemble ;
- (d) erreur due à l'évaporation dans le récipient (particulièrement importante dans les pays chauds) : de 0 à 4 pour cent ;
- (e) erreur due à la neige chassée par le vent et aux congères ;
- (f) erreur due à l'eau qui entre ou sort du pluviomètre par rejaillissement : 1 à 2 pour cent ;
- (g) erreurs instrumentales et erreurs d'observation aléatoires y compris celles dues aux lectures incorrectes.

Les six premières composantes de l'erreur sont systématiques et elles sont données par ordre d'importance globale. Le bilan des termes ayant pour origine le chasse-neige, les congères et les rejaillissements

peut être soit négatif, soit positif, alors que le bilan des erreurs systématiques dues au champ de vent et aux autres facteurs est négatif. Étant donné que les erreurs mentionnées ci-dessus en (e) et (f) sont difficiles à quantifier, le modèle général utilisé pour ajuster les données de la plupart des pluviomètres prend la forme suivante :

$$P_k = kP_c = k(P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3) \quad (6.1)$$

où P_k est la quantité de précipitation ajustée ; k un facteur d'ajustement pour la déformation du champ de vent (figure 6.3) ; P_c la quantité de précipitation captée par le collecteur du pluviomètre ; P_g la quantité de précipitation mesurée par le pluviomètre ; ΔP_1 l'ajustement pour les pertes par mouillage des parois internes du collecteur ; ΔP_2 l'ajustement pour les pertes par mouillage du récipient après que celui-ci a été vidé ; ΔP_3 l'ajustement pour tenir compte de l'évaporation se produisant dans le récipient.

Les corrections sont appliquées aux totaux journaliers ou mensuels ou, dans certains cas, à des phénomènes de précipitation individuels.

En général, les données supplémentaires nécessaires pour effectuer ce type d'ajustement comprennent la vitesse du vent au niveau de la bague du pluviomètre pendant la précipitation, la dimension des gouttes, l'intensité de la précipitation, la température et l'humidité de l'air ainsi que les caractéristiques du lieu d'implantation du pluviomètre. Bien que la température ait quelque effet sur le fonctionnement du pluviomètre, cet effet est significativement plus faible que celui de la vitesse du vent à la hauteur du capteur (Yang et al., 1993 ; 1995). La vitesse du vent et le type ou l'intensité des précipitations peuvent être des variables suffisantes pour déterminer les corrections à appliquer. On utilise parfois la seule vitesse du vent. Aux endroits où ces observations ne sont pas faites, on peut se servir de données interpolées à partir des observations exécutées dans des sites voisins, mais ceci avec prudence et seulement pour des ajustements portant sur des données mensuelles de pluie.

Pour la plupart des pluviomètres, la vitesse du vent est le plus important des facteurs environnementaux qui contribuent à donner des mesures des précipitations solides inférieures à la réalité. Pour obtenir des ajustements quotidiens, il faut déduire ces données des observations météorologiques habituelles effectuées sur le site. Lorsque l'on ne dispose pas de mesure de la vitesse du vent à la hauteur de l'ouverture du pluviomètre, cette donnée peut être dérivée en utilisant une méthode de réduction de la vitesse moyenne du vent, à condition de connaître la rugosité de la surface environnante et la hauteur

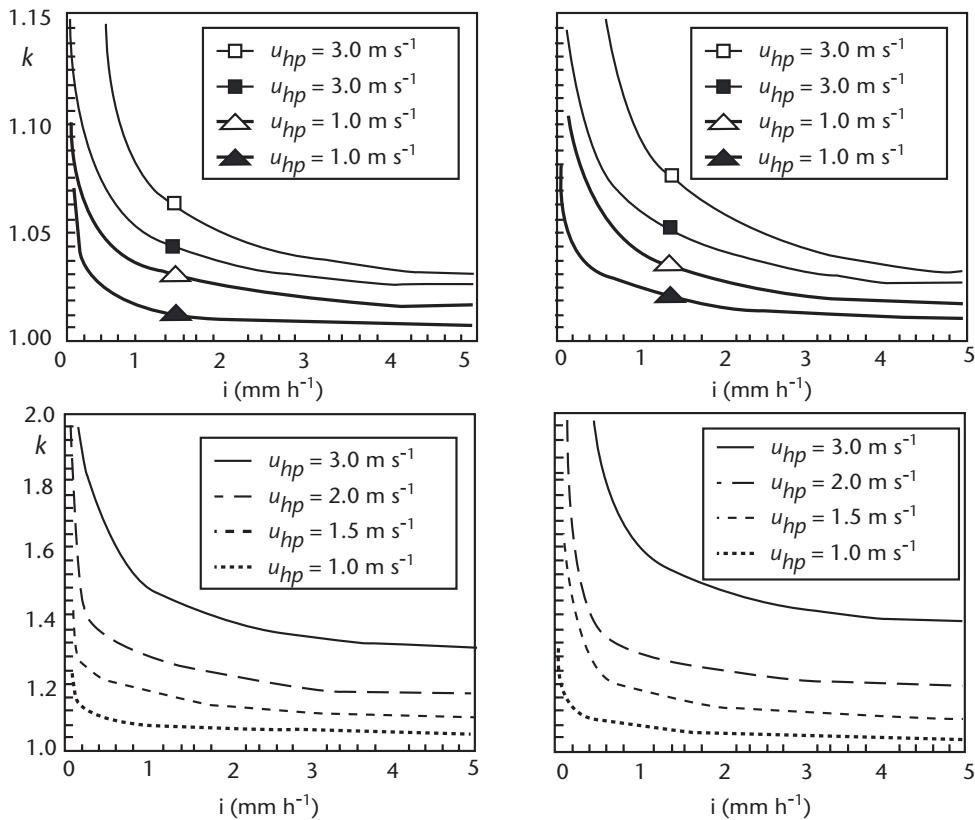


Figure 6.3. Facteur de conversion k , rapport de la précipitation « correcte » à la précipitation mesurée, pour la pluie (haut) et la neige (bas) pour deux capteurs sans écran en fonction de la vitesse du vent u_{hp} , l'intensité i et du type de temps d'après Nespor and Sevruk (1999). À gauche le pluviomètre manuel allemand Hellmann et à droite le pluviomètre à augets basculant de Lambrecht. Les symboles vides correspondent à des précipitations orographiques et les pleins à des averses. Noter les échelles différentes pour la pluie et la neige. Pour les pluviomètres munis d'écrans, k peut être réduit de 50 à 70 pour cent pour la neige et les précipitations mixtes, respectivement (WMO, 1998). Les pertes de chaleur ne sont pas considérées dans les graphiques (en Suisse elles varient en fonction de l'altitude entre 10 et 50 pour cent pour des valeurs mesurées pour la neige fraîche).

angulaire des obstacles environnants. L'Annexe 6.B² contient une formule suggérée. Ce processus dépend beaucoup du site et l'estimation requiert une bonne connaissance de l'implantation de la station et du pluviomètre. Les pluviomètres à écran collectent plus de précipitations que leurs homologues non abrités, en particulier pour les précipitations solides. En conséquence, les pluviomètres devraient être abrités soit naturellement (par exemple une clairière dans une forêt) soit artificiellement (par exemple : abri contre le vent de Alter ou de Tretyakov ou écran canadien de type Nipher) afin de minimiser les effets négatifs de la vitesse du vent sur les mesures des précipitations solides (pour des informations sur la conception des écrans voir (OMM, 1996) et (WMO,

1998)). Le type d'écran pour le vent comme le modèle de pluviomètre vont modifier la relation entre la vitesse du vent et l'efficacité du capteur et auront des implications en ce qui concerne l'homogénéité des données.

La perte par mouillage (Sevruk, 1974a) représente une autre perte systématique et cumulative qui touche les pluviomètres non enregistreurs et qui varie selon le type de la précipitation et celui de l'instrument; son importance est également fonction du nombre de fois où le pluviomètre est vidé. La perte moyenne par mouillage peut aller jusqu'à 0,2 mm par observation. Dans les stations synoptiques où les précipitations sont mesurées toutes les six heures, cette perte peut prendre une grande importance. Dans certains pays on a calculé que la perte par mouillage pouvait représenter 15 à 20 pour cent des précipitations mesurées durant l'hiver. Une solution possi-

² Formule de réduction du vent recommandée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation à sa onzième session, 1994.

ble consiste à appliquer une correction pour la perte par mouillage au moment de l'observation. Avec un pluviomètre bien conçu, la perte par mouillage peut être maintenue à un faible niveau. La méthodologie pour déterminer les pertes par mouillage des pluviomètres manuels (WMO, 1998) suffirait. Il est recommandé de réexaminer périodiquement les pertes par mouillage des pluviomètres manuels (par exemple tous les 5 ans) car elles tendent à changer avec l'âge du capteur. Les parois internes devraient être faites d'une matière qui puisse être maintenue lisse et propre : à titre d'exemple, la peinture est impropre à cet usage mais un émail à chaud est satisfaisant. Il convient de réduire le nombre de joints au minimum dans la construction.

Les pertes par évaporation (Sevruk, 1974b) varient selon le type de pluviomètre, la zone climatique et l'époque de l'année. La perte par évaporation est un problème avec les pluviomètres dont le récipient n'est pas équipé d'un entonnoir de prévention, notamment à la fin du printemps. On a constaté des pertes de plus de 0,8 mm par jour. En hiver, les pertes sont bien inférieures à celles des mois d'été comparables et vont de 0,1 à 0,2 mm par jour. Toutefois, ces pertes se cumulent. Dans un pluviomètre bien conçu, seule une petite surface d'eau est exposée, la ventilation est réduite au minimum et la température de l'eau est maintenue basse en utilisant une surface extérieure réfléchissante. Les erreurs associées à l'évaporation peuvent être pratiquement éliminées par un film d'huile pour les pluviomètres totalisateurs enregistreurs.

Il est évident que pour que les données soient compatibles lorsque les pluviomètres et les abris utilisés sont de types différents sur l'ensemble des conditions météorologiques, il faut appliquer des corrections aux mesures effectives. Chaque fois que l'on s'est efforcé de réduire les erreurs en ajustant les mesures pluviométriques, il est vivement recommandé de publier à la fois les valeurs mesurées et les valeurs ajustées.

6.5 PLUVIOMÈTRES ENREGISTREURS

Par rapport aux méthodes manuelles, l'enregistrement automatique des précipitations présente l'avantage d'une meilleure résolution temporelle ; il permet en outre de réduire les pertes dues à l'évaporation et au mouillage. Bien entendu, ce type d'instruments est sujet aux effets du vent traités à la section 6.4.

Trois modèles d'enregistreurs automatiques sont généralement utilisés pour la mesure des précipitations

: le modèle enregistreur à pesée, le modèle à augets basculants et le modèle à flotteur. Seul le modèle à pesée est utilisable pour tous les types de précipitations, l'emploi des deux autres modèles restant limité, dans la plupart des cas, au mesurage de la pluie. Il existe de nouveaux pluviomètres automatiques permettant de mesurer les précipitations sans parties mobiles. Ces instruments font appel à des dispositifs tels que les capteurs capacitifs, les transducteurs de pression, des dispositifs optiques ou de petits radars imprimant un signal électronique proportionnel à l'équivalent des précipitations. Un composant important de l'enregistreur est l'horloge qui fixe les intervalles de temps et les dates des enregistrements.

6.5.1 Pluviographe à pesée

6.5.1.1 Instruments

Dans ces instruments, le poids d'un récipient et de la précipitation qui s'y accumule est enregistré d'une manière continue soit au moyen d'un mécanisme à ressort, soit au moyen d'une balance à poids. Toute la précipitation, qu'elle soit sous forme solide ou liquide, est ainsi enregistrée au fur et à mesure qu'elle se produit. Ce type de pluviomètre ne comporte pas habituellement de dispositif automatique de vidange ; sa capacité (c'est-à-dire la hauteur maximale qui peut s'accumuler avant recharge) va de 150 mm à 750 mm. La maintenance de l'appareil devrait permettre de minimiser les pertes par évaporation, ce qui peut être obtenu en mettant dans le récipient du pluviomètre une quantité d'huile (ou de tout autre agent éliminant l'évaporation) suffisante pour former un film à la surface de l'eau. Les difficultés résultant des oscillations qui affectent la balance par vent fort peuvent être réduites par l'emploi soit d'un mécanisme amortisseur à huile, soit, si les travaux récents sont confirmés, d'un microprocesseur programmé de manière à éliminer les effets de ces oscillations sur les indications de l'appareil. Ces ensembles à pesée sont particulièrement utiles pour l'enregistrement de la neige, de la grêle et des mélanges pluie-neige, car il n'est pas nécessaire que les précipitations solides aient fondu pour qu'elles soient enregistrées. En hiver, le conteneur est pourvu d'une solution d'antigel (voir section 6.3.2) pour dissoudre les contenus solides. La quantité d'antigel dépend du volume escompté des précipitations et de la température minimale attendue au moment de la dilution minimale.

Le poids du collecteur, mesuré par un ressort calibré, est traduit du mouvement vertical en mouvement angulaire à l'aide d'un jeu de leviers ou de poulies. Ce mouvement angulaire est ensuite communiqué mécaniquement à un diagramme pour cylindre ou à un diagramme en bande ou encore numérisé à l'aide

d'un transducteur. L'exactitude de ces types d'instruments est directement liée à leurs caractéristiques de mesure et/ou d'enregistrement qui peuvent varier selon le fabricant.

6.5.1.2 Erreurs et corrections

A l'exception de l'erreur due à la perte par mouillage du conteneur lors de sa vidange, les pluviographes à pesée sont sujets à toutes les autres sources d'erreur mentionnées à la section 6.4. En outre, il convient de noter qu'ils ne sont pas par eux-mêmes capables d'identifier le type de précipitation. Avec ce type d'instruments, l'un des gros problèmes rencontrés est le fait que les précipitations, et notamment dans le cas de pluie se congelant ou de neige mouillée, peuvent adhérer à l'intérieur de l'ouverture de l'instrument et ne pas tomber tout de suite dans le seau. Ceci limite fortement la capacité des pluviographes à pesée à indiquer avec exactitude le moment auquel se produisent les phénomènes de précipitation. Autre défaut commun à ce type d'instruments, le pompage par le vent. Ceci se produit généralement par vents forts lorsque des courants d'air turbulents passent au-dessus et autour du récipient provoquant des oscillations du mécanisme de pesée. L'utilisation d'enregistreurs de données programmables permet de minimiser les erreurs associées à ces anomalies d'enregistrement en moyennant les lectures sur de brefs intervalles à savoir une minute. Des erreurs dans le temps donné par l'horloge peuvent attribuer la capture à une mauvaise période ou date.

L'utilisation des pluviographes à pesée permet d'éliminer ou tout au moins de minimiser certaines erreurs qui peuvent se produire avec les méthodes de mesure manuelles. Les erreurs aléatoires liées à l'erreur de l'observateur humain et à certaines erreurs systématiques, en particulier les pertes par évaporation et par mouillage, sont minimisées. Dans certains pays, on attribue officiellement la valeur zéro aux observations de précipitations en trace, ce qui entraîne une sous-estimation du total des précipitations saisonnières. Ce problème est réduit au minimum avec les pluviographes à pesée étant donné qu'avec le temps même les très faibles quantités de précipitations s'accumulent.

Il peut être plus difficile de corriger les données des appareils à pesée sur une base horaire ou journalière que sur des périodes plus longues, par exemple les résumés climatologiques mensuels. Les données anciennes des stations météorologiques automatiques, comme le vent à la hauteur de l'instrument, la température de l'air, le temps présent ou l'épaisseur de la neige sont utiles pour interpréter correctement et corriger les mesures des précipitations réalisées par les appareils automatiques.

6.5.1.3 Étalonnage et maintenance

Généralement, les pluviographes à pesée ont peu de parties mobiles; aussi ne devraient-ils pas nécessiter un étalonnage fréquent. Pour procéder à cet étalonnage, on emploie habituellement une série de poids qui, placés dans le seau ou conteneur donnent une valeur prédéterminée équivalant à une certaine quantité de précipitations. Normalement, les étalonnages devraient être effectués en laboratoire et selon les instructions du fabricant.

La maintenance régulière devrait être effectuée tous les trois à quatre mois, selon les conditions pluviométriques du site. L'instrument devrait être inspecté à l'intérieur et à l'extérieur pour vérifier s'il n'y a pas de pièces cassées ou desserrées et pour s'assurer qu'il est à niveau. Toute lecture manuelle devrait être comparée au diagramme ou à la bande enregistreuse afin d'en vérifier la cohérence avant d'enlever l'enregistrement ou de l'annoter. Le seau ou conteneur devrait être vidé, inspecté, nettoyé si nécessaire et à nouveau rempli d'huile lorsqu'il s'agit du seul mesurage de la pluie ou d'antigel et d'huile si des précipitations solides sont attendues (voir section 6.3.2). Le dispositif d'enregistrement devrait être remis à zéro afin de tirer un parti maximum de la capacité de l'instrument. La réserve de bande ou de papier à diagramme doit également être vérifiée et remplacée s'il y a lieu. Il peut être nécessaire d'utiliser un contrôleur universel pour remettre l'instrument à zéro lorsque l'on emploie un enregistreur de données ou encore pour vérifier l'alimentation électrique de l'instrument ou du système d'enregistrement. Les intervalles de temps et les dates des enregistrements doivent être contrôlés.

6.5.2 Modèle à augets basculants

Le pluviomètre à augets basculants est utilisé pour mesurer les totaux accumulés et l'intensité de la pluie. Mais il ne peut atteindre l'exactitude voulue à cause de la grande non linéarité des erreurs, particulièrement pour les précipitations de hautes intensités.

6.5.2.1 Instruments

Le principe de fonctionnement est simple. Un réservoir métallique léger divisé en deux compartiments, ou augets, est en équilibre instable autour d'un axe horizontal. En position normale, il repose sur l'une des deux butées dont l'équipement est pourvu, ce qui l'empêche de basculer complètement. L'eau passe du collecteur dans l'auge le plus haut, lequel bascule lorsqu'il a emmagasiné une quantité d'eau prédéterminée, amenant alors l'autre auget en position haute. La forme des augets est telle qu'ils se vident quand ils arrivent en position basse. La pluie

qui tombe pendant ce temps va dans l'auge que le basculement vient d'amener en position haute. Le mouvement de bascule des augets peut servir à commander un relais fournissant des impulsions qui permettent la réalisation d'un enregistrement pas à pas; sur le diagramme, l'intervalle entre deux pas représente le temps qu'il a fallu pour que soit reçue une quantité déterminée de précipitation. Lorsque des enregistrements détaillés sont nécessaires, cette quantité ne devrait pas dépasser 0,2 mm.

Le basculement des augets s'effectue en un temps réduit mais cependant fini ; il en résulte que, pendant la première partie du basculement, une certaine quantité de pluie arrive encore dans l'auge contenant la quantité d'eau qui vient d'être prise en compte. L'erreur qui en découle peut être importante en cas de fortes précipitations (250 mm h⁻¹), toutefois elle peut être contrôlée. La méthode la plus simple consiste à placer un dispositif du genre siphon au pied de l'entonnoir afin de diriger l'eau vers les augets avec une intensité contrôlée. Ceci lisse les crêtes d'intensité de précipitations de très courte période. Une autre solution consiste à ajouter un dispositif destiné à accélérer le basculement : ce dispositif consiste essentiellement en une petite palette qui, frappée par l'eau tombant du collecteur, exerce sur l'auge une poussée supplémentaire dont la force varie avec l'intensité de la précipitation.

Le pluviomètre à augets basculants est particulièrement approprié pour les stations météorologiques automatiques car il se prête aux méthodes numériques. L'impulsion provoquée par la fermeture d'un contact peut être surveillée à l'aide d'un enregistreur de données et le total peut être calculé sur des périodes de temps déterminées afin de donner la quantité de précipitations. Il peut également être utilisé avec un enregistreur à diagramme.

6.5.2.2 Erreurs et corrections

Avec ce type de pluviomètre les sources d'erreur sont quelque peu différentes des autres instruments de sorte qu'il est souhaitable de prendre des précautions particulières et d'apporter des corrections spéciales. Parmi ces sources d'erreur on peut citer les suivantes :

- (a) la perte d'eau lors du basculement de l'auge par forte pluie peut être réduite mais non supprimée ;
- (b) avec les augets de la forme la plus courante, la surface exposée de l'eau est grande par rapport au volume de celle-ci et il peut en résulter des pertes par évaporation appréciables, en particulier dans les régions chaudes. Cette perte peut être importante quand les précipitations sont faibles ;
- (c) le caractère discontinu de l'enregistrement peut

restreindre, par bruine légère ou pluie très faible, l'étendue des informations recueillies; il empêche, notamment, de déterminer avec exactitude l'instant où la précipitation a commencé et celui où elle a pris fin ;

- (d) de l'eau peut adhérer aux parois et à l'embouchure de l'auge ce qui y laisse des résidus de pluie et constitue un poids supplémentaire à compenser par le basculement. Des essais effectués avec des réservoirs cirés ont donné une réduction de quatre pour cent des volumes nécessaires pour rompre l'équilibre par rapport aux réservoirs non cirés. L'étalonnage volumétrique peut changer, sans que les vis d'étalonnage aient été ajustées, du fait d'une variation de la mouillabilité du réservoir due à une oxydation de la surface ou à une contamination par des impuretés et de variations de la tension en surface ;
- (e) le filet d'eau tombant de l'entonnoir sur l'auge exposé risque d'entraîner une lecture excessive, selon la dimension, la forme et la position de l'embout ;
- (f) l'instrument est particulièrement sujet au frottement des coussinets et à un mauvais basculement des augets lorsque le pluviomètre n'est pas plan.

Un étalonnage soigné peut apporter des corrections en ce qui concerne les parties systématiques de ces erreurs. Les mesures données par les pluviomètres à augets basculants peuvent être corrigées pour les effets de l'exposition comme dans le cas d'autres types de pluviomètres.

Un chauffage peut être utilisé pour permettre d'effectuer les mesures durant la saison froide, notamment pour les précipitations solides. Toutefois, on a observé que les performances des pluviomètres à augets basculants chauffés étaient très médiocres du fait d'importantes erreurs dues à la fois au vent et à l'évaporation de la neige fondu et il n'est donc pas recommandé de les utiliser pour mesurer les précipitations en hiver dans les régions où les températures descendent au-dessous de 0 °C durant des périodes prolongées.

6.5.2.3 Étalonnage et maintenance

L'étalonnage du pluviomètre à augets basculants est habituellement effectué en faisant passer un volume d'eau connu au travers du mécanisme basculant avec des intensités différentes et en ajustant le mécanisme en fonction de ce volume. Cette procédure devrait être appliquée en laboratoire.

Étant donné les nombreuses sources d'erreur, les caractéristiques de collecte et l'étalonnage des pluviomètres à augets basculants représentent une in-

teraction complexe de nombreuses variables. Des comparaisons journalières avec le pluviomètre étalon peuvent donner des facteurs de correction utiles et sont recommandables. Les facteurs de correction peuvent varier d'une station à l'autre. En général, ils sont supérieurs à 1,0 (sous-estimation) pour les pluies de faible intensité et inférieurs à 1,0 (surestimation) pour les pluies de forte intensité. La relation entre le facteur de correction et l'intensité n'est pas une relation linéaire, mais forme une courbe.

Au titre de la maintenance courante il faudrait nettoyer l'entonnoir et les augets de toute saleté ou débris accumulés et vérifier que le pluviomètre est bien à niveau. Il est fortement recommandé de remplacer tous les ans le mécanisme basculant par une unité nouvellement calibrée. Les intervalles de temps et les dates doivent être vérifiés.

6.5.3 Pluviographes à flotteur

Dans ce modèle d'instrument, la pluie passe dans un réservoir contenant un flotteur de faible masse. Le déplacement de celui-ci, lorsque le niveau d'eau monte dans le réservoir, commande le déplacement de la plume sur le diagramme par un mécanisme approprié ou est converti en signal digital par un transducteur. Par un choix judicieux de la surface de réception du pluviomètre, du flotteur et du réservoir, on peut obtenir l'échelle d'enregistrement que l'on souhaite.

Pour obtenir un enregistrement sur une période suffisante (généralement 24 heures), il est nécessaire de disposer soit d'un réservoir de grande contenance (dans ce cas, l'échelle obtenue sur le diagramme ou tout autre moyen d'enregistrement est compressée), soit d'un mécanisme assurant automatiquement la vidange rapide du réservoir quand il est plein, ce qui remet la plume ou tout autre indicateur à zéro. Habituellement, cette fonction est remplie par un dispositif à siphon. Ce dispositif devrait avoir un démarrage franc, sans phénomène de goutte à goutte, aussi bien au début qu'à la fin de la période de siphonage dont la durée ne devrait pas dépasser 15 secondes. Dans certains instruments, l'ensemble réservoir est monté sur des couteaux de manière qu'il puisse basculer lorsqu'il est plein ; la poussée de l'eau facilite le siphonage et le réservoir retourne à sa position initiale quand il est vide. Dans d'autres enregistreurs, un siphon forcé assure la vidange en moins de cinq secondes. Un modèle à siphon forcé est muni d'un petit réservoir distinct du réservoir principal, qui recueille la pluie tombant pendant l'opération de siphonage. Ce réservoir auxiliaire se vide dans le réservoir principal à la fin de cette opération, ce qui garantit un enregistrement exact de la totalité de la précipitation.

Pendant l'hiver, s'il y a risque de gel, un chauffage (commandé de préférence par thermostat) devrait être installé à l'intérieur de l'appareil. Ceci évite la détérioration du réservoir et de son flotteur tout en permettant de poursuivre l'enregistrement des précipitations durant la période de froid. Dans les endroits desservis en électricité, une petite résistance chaufante ou une ampoule électrique suffit ; ailleurs, il est nécessaire de faire appel à d'autres sources d'énergie. Une méthode satisfaisante consiste à enrouler un ruban chauffant autour du collecteur et à le relier à une batterie de grande capacité. La quantité de chaleur fournie doit être juste suffisante pour empêcher le gel, car un excédent de chaleur pourrait diminuer l'exactitude des observations en provoquant un accroissement des mouvements verticaux de l'air au-dessus du pluviomètre et une augmentation des pertes par évaporation.

Dans certains pays on a observé, comme dans le cas des modèles à pesée (voir section 6.5.1.2), une nette diminution de la quantité de précipitation recueillie avec des pluviomètres chauffés non abrités, à cause du vent et de l'évaporation de la neige fondante.

Mis à part le fait que l'étalonnage est effectué en utilisant un volume d'eau connu, l'entretien de ce pluviomètre est semblable à celui des modèles à pesée (section 6.5.1.3).

6.6 MESURE DE LA ROSÉE, DU DÉPÔT DE GLACE ET DES PRÉCIPITATIONS DE BROUILLARD

6.6.1 Mesure de la rosée et du mouillage des feuilles

Bien que ne fournissant que des quantités d'eau relativement faibles et variables d'un endroit à l'autre, la rosée, phénomène essentiellement nocturne, peut être dans les régions arides d'un grand intérêt ; dans les régions très arides, elle peut produire des quantités d'eau du même ordre de grandeur que celles apportées par la pluie. L'exposition des feuilles des plantes à l'humidité à l'état liquide due à la rosée, au brouillard et aux précipitations joue également un rôle important dans les maladies des plantes et l'activité des insectes ainsi que dans le cadre des récoltes et des soins aux cultures.

Pour évaluer la contribution hydrologique de la rosée, il convient d'établir une distinction entre :

- (a) la rosée résultant du transport vers le bas de l'humidité atmosphérique et de sa condensation sur les surfaces refroidies, connue comme dépôt de rosée;

- (b) la rosée formée par la condensation sur les surfaces refroidies de la vapeur d'eau qui s'évapore du sol et des plantes, connue comme rosée de distillation;
- (c) la rosée formée par de l'eau exsudée des feuilles, connue comme sudation.

Ces trois sources concourent simultanément à l'apparition de la rosée observée, mais seule la première fournit à la surface du sol un supplément d'eau et la dernière entraîne habituellement une perte nette. Une source supplémentaire d'humidité est constituée par les gouttelettes provenant des nuages ou du brouillard qui se déposent sur les feuilles, les branches ou les brindilles des arbres et qui atteignent le sol soit en tombant goutte à goutte, soit en ruisseant le long des troncs.

La quantité de rosée déposée sur une surface donnée pendant un intervalle de temps déterminé est habituellement exprimée soit en kg m^{-2} , soit, suivant l'épaisseur du dépôt, en millimètres. Autant que possible, cette quantité devrait être mesurée à un dixième de millimètre près.

Le mouillage des feuilles peut être décrit comme léger, modéré ou fort, mais les éléments les plus importants à mesurer sont l'heure de son début et sa durée.

La publication OMM (WMO, 1992b) passe en revue les instruments mis au point pour mesurer la rosée et la durée du mouillage des feuilles et donne une bibliographie sur ce sujet.

Les méthodes suivantes de mesure du mouillage des feuilles sont à considérer.

La quantité de rosée dépend fortement des propriétés de la surface sur laquelle elle se dépose, par exemple ses propriétés radiatives, ses dimensions et son aspect (surface horizontale ou verticale). Elle peut être mesurée en exposant une plaque, ou surface, naturelle ou artificielle, dont les propriétés sont connues ou normalisées, et en évaluant la quantité de rosée par pesée, par observation visuelle, ou en faisant appel à une autre quantité telle que la conductivité électrique. Le problème réside dans le choix de la surface étant donné que les résultats fournis par les instruments ne sont pas nécessairement représentatifs des dépôts de rosée sur les objets environnants. Il est par conséquent nécessaire d'établir, pour chaque cas particulier de caractéristiques de surface et de conditions d'exposition, une relation empirique entre les résultats des mesurages instrumentaux et les quantités de rosée qui se déposent sur les éléments naturels, et de faire une distinction entre les processus de formation de la rosée lorsque cet élément présente de l'importance pour l'application visée.

Un certain nombre d'équipements sont utilisés pour mettre en évidence et mesurer directement la quantité et la durée du mouillage des feuilles et de la rosée. Les enregistreurs de la durée de la rosée utilisent soit des éléments dont les caractéristiques varient lorsqu'ils sont mouillés et qui peuvent ainsi servir à indiquer ou enregistrer la durée du mouillage, soit des capteurs électriques dans lesquels la résistance superficielle de feuilles naturelles ou artificielles est modifiée par l'eau fournie par la pluie, la neige, le brouillard ou la rosée. Dans les balances à rosée, la quantité d'eau déposée par les précipitations ou la rosée est pesée et enregistrée. Avec la plupart des instruments effectuant un enregistrement continu, l'examen des particularités de l'enregistrement permet de faire la distinction entre les dépôts attribuables au brouillard, à la pluie ou à la rosée. L'unique méthode de mesure sûre permettant d'obtenir le bilan de la seule chute de rosée repose sur l'utilisation d'un lysimètre extrêmement sensible (voir chapitre 10, Partie I).

(WMO, 1992b) prône la mise au point de deux instruments électroniques particuliers donnés en tant qu'instruments de référence pour la mesure du mouillage des feuilles. Plusieurs modèles de simulation du mouillage des feuilles ont été proposés. Certains utilisent comme approche le bilan énergétique (inverse des modèles d'évaporation), d'autres les corrélations. Nombre d'entre eux requièrent des mesures micro-météorologiques. Malheureusement, il n'existe pas de méthode standard de mesure reconnue permettant de les vérifier.

6.6.2 Mesure des dépôts de glace

Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de l'accumulation de glace sur une surface. Les conditions de givrage les plus dangereuses sont l'accumulation de glace due à des précipitations verglaçantes, souvent appelées verglas. En effet, ce phénomène peut endommager les arbres et arbustes, les lignes électriques et téléphoniques et représenter un danger sur les routes et les pistes. La gelée blanche (dénommée communément gel) se forme lorsque de l'air dont la température du point de rosée est inférieure à la température de congélation est amené à saturation par refroidissement. Il s'agit d'un dépôt de cristaux de glace imbriqués formés par condensation directe sur des objets ou éléments de diamètre généralement faible tels que les branches d'arbre, tiges de plantes, bords de feuilles, fils électriques, poteaux, etc. Le givre est un dépôt granuleux de glace blanc ou laiteux et opaque provenant de la congélation rapide de gouttelettes d'eau en surfusion au contact d'un objet exposé.

6.6.2.1 Méthodes de mesure

Dans les stations météorologiques, l'observation des dépôts de glace est généralement une opération plus qualitative que quantitative, surtout en raison de l'absence de capteurs appropriés. On utilise des indicateurs d'accrétion de glace, habituellement fabriqués en aluminium anodisé, pour observer et relever l'apparition de précipitation verglaçante, gelée blanche ou givre.

Les observations des dépôts de glace peuvent comprendre à la fois la mesure des dimensions et du poids du dépôt de glace et une description de son aspect. Elles sont particulièrement importantes dans les zones montagneuses où ces dépôts peuvent, sur la face au vent de ces zones, excéder les précipitations normales. Un dispositif constitué d'un poteau et de baguettes sur lesquelles sont montées deux paires de fils parallèles, orientées respectivement nord-sud et est-ouest, peut être utilisé pour obtenir les dépôts de glace devant servir de base à l'observation. Les fils sont suspendus à un niveau quelconque, et le fil supérieur de chaque paire doit être amovible. Au moment de l'observation, les deux fils supérieurs sont retirés, placés dans un récipient spécial et transportés dans la station pour que le dépôt de glace y fonde et puisse être pesé. On mesure la section transversale du dépôt sur les fils les plus bas qui demeurent toujours en place.

Dans certains pays, on mesure en continu la formation du givre à l'aide d'instruments enregistreurs dont le capteur est un barreau, un anneau ou une plaque, verticaux ou horizontaux ; l'augmentation de la quantité de givre en fonction du temps s'inscrit sur un diagramme. Un appareil simple, appelé ice-scope, permet de déterminer la présence de givre ou de gelée blanche sur une surface neigeuse, ainsi que leur aspect. Il se compose d'un disque en contreplaqué, de 30 cm de diamètre, qui coulisse le long d'une tige plantée verticalement dans le sol et peut être bloqué en un point quelconque de cette tige. En position d'utilisation normale, il est bloqué au ras de la neige, où il recueille le givre et la gelée. Le givre se dépose également sur un anneau de 20 cm de diamètre, fixé à 20 cm de l'extrémité supérieure de la tige. Un fil de métal ou de matière textile, dont le diamètre avoisine 0,2 ou 0,3 mm, est tendu entre l'anneau et cette extrémité ; il sert à mesurer le dépôt de givre. Il est possible, au besoin, de démonter chacun des capteurs pour le peser.

6.6.2.2 Verglas

Des capteurs ont été mis au point et servent actuellement à la détection et à la description du verglas sur les routes et les pistes ainsi qu'au soutien des programmes d'alerte et de maintenance.

En combinant plusieurs mesures il est possible de détecter la neige sèche et mouillée ainsi que plusieurs formes de gel. Un capteur utilisant deux électrodes incrustées dans la route au ras de la surface mesure la conductivité électrique de la surface et distingue aisément les surfaces sèches des surfaces mouillées. Une deuxième mesure, celle de la polarisabilité ionique, détermine la capacité de la surface à tenir une charge électrique : on fait passer une petite charge entre deux électrodes pendant un bref instant puis les mêmes électrodes mesurent la charge résiduelle, qui est plus élevée en présence d'un électrolyte à ions libres tel que de l'eau salée. Les mesures de la polarisabilité et de la conductivité prises ensemble permettent de faire la différence entre les surfaces sèches, humides et mouillées ainsi qu'entre le gel, la neige, la gelée blanche et certains produits chimiques de dégel. Toutefois, étant donné que dans certaines conditions la polarisabilité du verglas non cristallin ne peut être distinguée de celle de l'eau, ces dangereuses conditions ne peuvent encore être détectées au moyen des deux capteurs. Un système au moins permet de résoudre ce problème en ajoutant un troisième mesurage capacitif spécialisé qui détecte la structure particulière du verglas.

La méthode décrite ci-dessus est une méthode passive. Il existe une technique de terrain active qui fait appel soit à un élément chauffant, soit à la fois à un élément chauffant et un élément refroidissant, pour faire fondre ou geler toute glace ou tout liquide présent sur la surface. Des mesures simultanées de la température et de l'énergie thermique impliquée dans le cycle fonte-gel sont utilisées pour déterminer la présence de glace et estimer le point de congélation du mélange déposé sur la surface.

La plupart des systèmes de terrain comprennent un thermomètre permettant de mesurer la température de la chaussée en surface. La qualité de la mesure repose largement sur le montage (particulièrement du matériel) et l'exposition, et il importe de prendre soin d'éviter toute erreur due au rayonnement.

Deux méthodes de détection à distance sont actuellement en cours de mise au point, méthodes qui sont adaptées aux systèmes montés sur les véhicules. L'une repose sur la réflexion, à plusieurs fréquences (environ 3000 nm et 3 GHz, respectivement), du rayonnement infrarouge et du rayonnement à hyperfréquence. Les réflexions des hyperfréquences peuvent déterminer l'épaisseur de la couche d'eau (et donc le risque d'aqua-planing), mais non les conditions de gel. Deux fréquences dans l'infrarouge peuvent être utilisées pour différencier les conditions sèches, mouillées et gelées. On a également démontré que la grandeur de la puissance réfléchie à des longueurs d'onde voisines de 2000 nm dépendait de l'épaisseur de la couche de glace.

La deuxième méthode applique des techniques de reconnaissance des configurations à la réflexion d'un rayon laser par la chaussée, pour différencier les surfaces sèches des surfaces mouillées et du verglas.

6.6.3 Mesure des précipitations de brouillard

Le brouillard est une suspension dans l'atmosphère de minuscules gouttelettes d'eau formant un nuage à la surface de la Terre. Le diamètre de ces gouttelettes est compris entre 1 et 40 μm environ et leur vitesse de chute entre moins d'1 cm s^{-1} et environ 5 cm s^{-1} . En fait, la vitesse de chute des gouttelettes de brouillard est si faible que, même par vents légers, les gouttelettes se déplacent presque à l'horizontale. Par temps de brouillard, la visibilité horizontale est généralement inférieure à 5 km et l'on observe rarement la présence de brouillard lorsqu'il y a plus de 2 °C d'écart entre la température de l'air et la température du point de rosée.

Généralement, le brouillard préoccupe plus les météorologues en tant que phénomène obstruant la visibilité qu'en tant que forme de précipitation. Toutefois, d'un point de vue hydrologique, dans certaines régions arborées de haute altitude fréquemment sujettes au brouillard du fait de l'advection des nuages au-dessus de la surface de la montagne, la seule prise en compte des précipitations conduit à sous-estimer fortement l'apport d'eau aux bassins hydrographiques (Stadtmauer et Agudelo, 1990). Plus récemment, la reconnaissance du brouillard en tant que source d'approvisionnement en eau dans les zones élevées (Schemenauer et Cereceda, 1994a) et en tant que mode de dépôt humide (Schemenauer et Cereceda, 1991; Vong, Sigmon et Mueller, 1991) a conduit à la nécessité de normaliser méthodes et unités de mesure. Les méthodes de mesure suivantes sont examinées.

Ces cent dernières années, beaucoup de mesures du brouillard collecté par les arbres et divers types de collecteurs ont été effectuées, toutefois, il est difficile de procéder à une comparaison quantitative du rythme d'accumulation. L'instrument le plus utilisé pour mesurer le brouillard se compose d'un cylindre vertical en grillage métallique fixé et centré au-dessus d'un pluviomètre de manière à être pleinement exposé à l'air circulant librement. Le cylindre mesure 10 cm de diamètre et 22 cm de haut et la maille du grillage est de 0,2 x 0,2 cm (Grunow, 1960). Les gouttelettes d'air chargé d'humidité se déposent sur le grillage et tombent dans le collecteur du pluviomètre où elles sont mesurées et enregistrées comme pour une chute de pluie. Entre autres problèmes, cet instrument a pour inconvénients sa petite taille, son manque de représentativité eu égard à la végétation, le stockage de l'eau dans les petites ouvertures du grillage et le risque d'in-

roduction directe dans le pluviomètre de précipitations qui brouillent la mesure du dépôt de brouillard. En outre, le calcul des précipitations de brouillard en soustrayant simplement la quantité de pluie donnée par un pluviomètre de référence (Grunow, 1963) de celle donnée par le collecteur de brouillard conduit à des erreurs dès qu'il y a présence de vent.

Schemenauer et Cereceda (1994b) proposent un collecteur standard de brouillard d'1 m^2 et un système standard de mesurage bon marché, permettant de quantifier l'importance du dépôt dû au brouillard dans les régions arborées de haute altitude et de mesurer la vitesse de collecte potentielle dans les chaînes de montagnes dénudées ou désertes. Le collecteur consiste en un panneau plat fait d'un grillage de polypropylène durable et monté avec sa base à deux mètres au-dessus du sol. Ce collecteur est associé à un pluviomètre à auges basculants afin de déterminer l'intensité des dépôts. Lorsque la vitesse du vent est mesurée en parallèle, il est possible d'obtenir des estimations raisonnables des proportions de brouillard et de pluie déposées sur le panneau grillagé vertical. Ce collecteur fournit des résultats en litres d'eau. Étant donné que sa superficie est d'1 m^2 , cela donne une collecte en 1 m^{-2} .

6.7 MESURE DES CHUTES DE NEIGE ET DU MANTEAU NEIGEUX

En la matière, les textes faisant autorité sont le Guide des pratiques hydrologiques (OMM, 1996) et le Rapport d'hydrologie opérationnelle N° 35 (WMO, 1992a), qui traitent les aspects hydrologiques, y compris les méthodes de relevé sur les cheminement nivométriques. Les paragraphes ci-après donnent un rapide résumé de certaines méthodes simples et bien connues et passent brièvement en revue les instruments.

On entend par chute de neige l'épaisseur de la neige fraîche qui s'est déposée pendant une période déterminée (généralement 24 heures). Il en résulte qu'une chute de neige ne comprend pas les congères ou les accumulations de neige dues à l'action du vent. Pour les besoins du mesurage de l'épaisseur, le terme de neige devrait également inclure les granules de glace, le verglas, la grêle et la glace de surface provoquée directement ou indirectement par les précipitations. Par épaisseur de neige, on entend généralement l'épaisseur totale de la neige au sol à l'heure de l'observation.

On entend par équivalent en eau du manteau neigeux l'épaisseur de la couche d'eau que produirait sa fonte.

6.7.1 Épaisseur d'une chute de neige

Les mesures directes de l'épaisseur de la neige fraîche sur un terrain dégagé s'effectuent avec une règle ou une échelle graduées. Afin d'obtenir une valeur moyenne réellement représentative, il faut procéder à un nombre suffisant de mesurages verticaux dans des endroits où l'on considère qu'il n'y a pas eu de phénomènes de chasse-neige. Là où de vastes accumulations de neige dues au vent se produisent, un plus grand nombre de mesures sont nécessaires pour obtenir une épaisseur représentative. Des précautions toutes particulières devraient être observées pour éviter de reprendre en compte la neige des chutes antérieures. On peut, pour cela, déneiger complètement une parcelle de terrain ou placer sur la couche de neige ancienne une plaque d'un matériau convenable (plaqué de bois un peu rugueuse, peinte en blanc, par exemple), puis mesurer l'épaisseur de la neige qui s'y dépose. Dans le cas d'une surface en pente (à éviter autant que possible), les mesures doivent également se faire en tenant la règle verticalement. Lorsqu'il y a une couche de neige ancienne, l'épaisseur de la neige fraîche qui serait obtenue en effectuant la différence entre deux mesures consécutives serait erronée, toute couche de neige ayant tendance à se tasser et à devenir de ce fait moins épaisse.

6.7.2 Mesures directes de l'épaisseur du manteau neigeux

Les mesures de l'épaisseur du manteau neigeux ou de la neige accumulée au sol sont effectuées au moyen d'une règle à neige, ou d'une baguette graduée similaire, enfoncee dans la neige jusqu'à la surface du sol. Il peut être difficile d'obtenir des mesures représentatives de l'épaisseur par cette méthode dans les zones exposées étant donné que le vent risque de chasser la neige et d'en modifier la répartition et que le manteau neigeux peut contenir des couches de glace entravant la pénétration de la règle. Il convient de s'assurer que l'on mesure bien l'épaisseur totale, y compris l'épaisseur de toute couche de glace éventuellement présente. À chaque station d'observation, plusieurs mesures sont récoltées puis une moyenne est calculée.

L'implantation de plusieurs perches, peintes d'anneaux de couleurs alternées ou graduées d'une autre manière appropriée, constitue un moyen pratique pour mesurer la hauteur totale de neige accumulée sur le sol, notamment dans les régions isolées. L'épaisseur de la neige à la perche ou à l'indicateur peut être observée à distance, soit à partir du sol soit depuis un avion, à l'aide de jumelles ou de télescopes. Les perches devraient être peintes en blanc de façon à réduire le plus possible la fonte de la neige à

proximité. Les indicateurs d'épaisseur de neige destinés à une lecture aérienne sont des poteaux verticaux (de longueur variable, selon l'épaisseur maximale de la neige), munis de barreaux transversaux placés horizontalement à des hauteurs données et orientés en fonction du point d'observation.

La mise au point d'un télémètre à ultrasons bon marché pour obtenir des mesures fiables de la hauteur de neige dans les stations automatiques s'est révélée comme une solution pratique pour remplacer les observations standards, tant pour la hauteur de neige que pour les chutes de neige fraîche (Goodison et al., 1988). Ce capteur peut servir à contrôler la qualité des mesures obtenues à l'aide de capteurs enregistreurs automatiques de précipitations en donnant des détails supplémentaires sur le type et le volume des précipitations, ainsi que des détails horaires. Il permet une exactitude de $\pm 2,5$ cm.

Formule de correction de température pour les mesures de l'épaisseur de neige par ultrasons :

$$d = d_r \sqrt{\frac{T}{273.15}} \quad (6.2)$$

où :

- d = épaisseur de la neige en cm
- d_r = valeur brute de l'épaisseur de neige en cm
- T = température de l'air en °K
- T = $273.15 + t$, t = température de l'air en °C

6.7.3 Mesures directes de l'équivalent en eau de la neige

La méthode standard pour mesurer l'équivalent en eau consiste à effectuer un mesurage gravimétrique après avoir prélevé un échantillon à l'aide d'un tube à neige. Cette méthode sert de base aux relevés de l'enneigement, procédure courante dans de nombreux pays pour obtenir une mesure de l'équivalent en eau. Elle consiste soit à faire fondre chaque échantillon puis à en mesurer le contenu liquide, soit à peser l'échantillon encore gelé. Pour faire fondre l'échantillon on peut utiliser une quantité d'eau chaude connue ou une source de chaleur.

Il est possible de prélever des échantillons cylindriques de neige fraîche à l'aide d'un échantilleur approprié puis de les peser ou de les faire fondre. La description détaillée des instruments et des techniques d'échantillonnage en usage figure dans le *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM, 1996). Avec ce type de technique on utilise souvent le trop-plein d'un pluviomètre standard.

Les nivomètres mesurent directement l'équivalent en eau de la chute de neige. A la base, tous les plu-

viomètres non-enregistreurs peuvent également servir à mesurer l'équivalent en eau des précipitations solides. La neige collectée au moyen de ce type d'Instrument devrait être soit pesée soit fondue immédiatement après chaque observation, comme indiqué dans la section 6.3.1.2. Le pluviomètre enregistreur à pesée collecte aussi bien les précipitations solides que les précipitations liquides et enregistre l'équivalent en eau de la même manière que les formes liquides (voir section 6.5.1).

L'équivalent en eau des précipitations solides peut également être estimé en utilisant l'épaisseur de la chute de neige fraîche. On convertit cette épaisseur en son équivalent en eau à l'aide d'une densité spécifique appropriée. La relation qui attribue à un centimètre de neige fraîche un équivalent en eau d'un millimètre est utilisable, moyennant certaines précautions, pour déterminer des valeurs moyennes sur une longue période, mais risque de se révéler hautement imprécise pour des mesures isolées, la densité spécifique de la neige pouvant varier de 0,03 à 0,4.

6.7.4 Coussins à neige

Ces coussins servent à mesurer le poids de la neige qui se dépose à leur surface. Ils sont de dimensions variables et fabriqués en divers matériaux. Les plus courants revêtent la forme de poches circulaires (d'un diamètre de 3,7 m), en tissus caoutchouté, remplies d'un mélange antigel fait d'alcool méthylique et d'eau ou d'une solution de méthanol, de glycol et d'eau. Le coussin s'installe à fleur de sol ou s'enfouit légèrement dans celui-ci, sous une fine couche de terre ou de sable. Il est recommandé de positionner une clôture autour du site pour éviter que l'équipement ne soit détérioré et que l'état naturel du manteau neigeux ne soit modifié. Dans des conditions d'utilisation normales, un coussin à neige reste utilisable une dizaine d'années ou plus.

La pression hydrostatique à l'intérieur du coussin est proportionnelle au poids de la neige qui le recouvre. La mesure de cette pression, au moyen d'un enregistreur manométrique à liquide et flotteur ou d'un transducteur, permet de déterminer continuellement l'équivalent en eau du manteau neigeux. Les fluctuations de la température risquent d'affecter l'exactitude des mesures. Lorsque le manteau est peu épais, les changements de température diurnes peuvent provoquer l'expansion ou la contraction du fluide contenu dans le coussin conduisant alors à de fausses indications de chute ou de fonte de la neige. En montagne, lorsque le stock de neige est épais, les fluctuations diurnes de la température ne revêtent pas d'importance excepté au début et à la fin de la saison des neiges. On peut remédier à ces effets de la température en plaçant le tuyau d'arrivée à l'élé-

ment de mesure dans un abri dont la température est maintenue constante ou en l'enterrant.

Les systèmes d'acquisition de données sur le terrain et/ou à distance peuvent être installés de manière à fournir une mesure en continu de l'équivalent en eau de la neige à l'aide de diagrammes ou d'enregistreurs numériques.

Les résultats obtenus par la méthode des coussins diffèrent, en particulier pendant la période de fonte des neiges, de ceux obtenus avec les tubes à neige classiques. Ils sont plus fiables quand le manteau neigeux ne comporte pas de couches de glace pouvant créer des «ponts» au-dessus des coussins.

Une comparaison des valeurs de l'équivalent en eau obtenues respectivement par la méthode du coussin et par la méthode classique de la pesée a montré qu'elles pouvaient différer entre elles de 5 à 10 pour cent.

6.7.5 Nivomètres à radio-isotopes

Des instruments nucléaires mesurent l'équivalent total en eau du manteau neigeux et/ou fournissent un profil de densité. Il s'agit d'une méthode d'échantillonnage non destructrice adaptable à l'enregistrement in situ et/ou aux systèmes de télémesure. Presque tous les systèmes fonctionnent sur le principe selon lequel l'eau, la neige ou la glace atténuent le rayonnement. Comme pour les autres méthodes de mesurage ponctuel, la représentativité du lieu d'implantation est essentielle pour que les mesures ponctuelles puissent être interprétées et appliquées en tant qu'indices surfaciques.

Les instruments utilisés pour mesurer le contenu total en eau se composent d'un récepteur de rayonnement et d'une source, naturelle ou artificielle. L'une des parties du système (le détecteur ou la source) est placée à la base du stock nival et l'autre au-dessus de la hauteur maximale de neige prévue. À mesure que la neige s'accumule, le taux de comptage diminue proportionnellement à l'équivalent en eau du stock de neige. Les systèmes qui font appel à une source de rayonnement artificielle sont utilisés en des points fixes et ne donnent de mesure que pour le site choisi. Des résultats satisfaisants ont été obtenus pour mesurer des accumulations de neige allant jusqu'à 500 mm d'équivalent en eau ou une épaisseur de 150 cm avec un système faisant appel à de l'uranium présent naturellement comme source annulaire autour d'un poteau détecteur unique.

Un nivomètre profileur radioactif implanté en un lieu fixe fournit des données sur l'équivalent total en eau de la neige et sur la densité et permet d'étu-

dier avec exactitude les mouvements de l'eau et les modifications de densité qui se produisent dans le stock nival avec le temps (Armstrong, 1976). Un nivomètre profileur se compose de deux tuyaux d'accès parallèles placés verticalement, espacés d'environ 66 cm et allant d'une base cimentée implantée dans le sol jusqu'à une hauteur supérieure à la hauteur de neige attendue. Une source de rayons gamma est suspendue dans l'un des tubes et un détecteur ou scintilleur à rayons gamma, attaché à un tube photomultiplicateur dans l'autre. La source et le détecteur sont placés à des profondeurs égales dans le manteau neigeux et une mesure est effectuée. Des profils de la densité verticale du manteau neigeux sont obtenus en effectuant des mesures sur la hauteur, par pas de 2 cm. Il est également possible d'utiliser un nivomètre portatif (Young, 1976) mesurant la densité du manteau neigeux par rétrodiffusion plutôt que par transmission des rayons gamma, évitant de creuser des fosses à neige. En outre le caractère portatif de l'instrument permet d'évaluer les variations surfaciques de la densité et de l'équivalent en eau.

6.7.6 Rayonnement gamma naturel

Les relevés de l'enneigement par la méthode du rayonnement gamma naturel reposent sur l'utilisation de l'atténuation par la neige du rayonnement gamma émis par les éléments radioactifs naturels de la couche supérieure du sol. Plus l'équivalent en eau de la neige est grand, plus l'atténuation du rayonnement gamma est importante. Ce type de relevé peut consister soit en une mesure ponctuelle obtenue en un site éloigné, soit en une série de mesures

ponctuelles, soit en un cheminement déterminé dans une région (Loijens, 1975). Les relevés peuvent également être effectués par avion. L'équipement comprend un spectromètre portatif à rayons gamma utilisant un petit cristal qui mesure les rayons sur un large spectre et dans trois gammes spectrales (émissions de potassium, d'uranium et de thorium). Avec cette méthode, il est nécessaire de disposer de mesures du niveau de rayonnement gamma au point de mesure ou le long du cheminement avant l'accumulation du manteau neigeux. Pour obtenir des estimations absolues de l'équivalent en eau de la neige, il est nécessaire d'effectuer des corrections rendues nécessaires par les variations de l'humidité du sol dans ses 10 à 20 premiers centimètres, par les variations du rayonnement de fond induit par les rayons cosmiques, par la dérive de l'instrument et par le lessivage du radon (source de rayonnement gamma) par les précipitations et son accumulation ultérieure dans le sol ou dans la neige. Pour déterminer la relation entre les comptages du spectromètre et l'équivalent en eau, il est nécessaire de procéder initialement à des mesures complémentaires de l'équivalent en eau de la neige. Les étalons de référence habituels sont les mesures obtenues à l'aide des tubes à neige.

La méthode de mesure au moyen du rayonnement gamma naturel peut être utilisée pour des stocks neigeux représentant jusqu'à 300 mm d'équivalent en eau. Si les corrections appropriées sont apportées, son exactitude est de ± 20 mm. Son avantage par rapport à l'utilisation de sources artificielles de rayonnement tient à l'absence de risque dû au rayonnement.

ANNEXE 6.A

SITES DE COMPARAISON DE MESURES DES PRÉCIPITATIONS

Lors de sa onzième session, qui s'est déroulée en 1994, la Commission des instruments et des méthodes d'observation a formulé, en ce qui concerne les sites de comparaison des mesures des précipitations, la déclaration ci-après :

La Commission reconnaît les avantages des sites ou des centres pluviométriques nationaux où les instruments et les méthodes de mesure des précipitations, anciens, actuels et nouveaux, peuvent être évalués en permanence par des stations désignées à cet effet. Ces stations d'évaluation seraient chargées :

- (a) d'assurer le fonctionnement des types de capteurs recommandés par l'OMM pour la pluie (pluviomètre enterré) et pour la neige (instrument de référence et de comparaison à double barrière). En ce qui concerne l'installation et le fonctionnement des capteurs, il faudra appliquer les spécifications OMM des comparaisons des mesures de précipitations. L'installation d'un instrument de référence et de comparaison à double barrière sera inutile si la pluie est le seul élément observé ;
- (b) d'assurer le fonctionnement des instruments de mesure des précipitations utilisés en exploitation, de types anciens, actuels et nouveaux, et d'appliquer d'autres méthodes d'observation, suivant les pratiques normalisées, afin d'en évaluer l'exactitude et les performances comparativement à celles des instruments de référence recommandés par l'OMM ;
- (c) d'exécuter des mesures météorologiques complémentaires qui permettront de mettre au point et à l'essai des méthodes de correction des mesures des précipitations ;
- (d) d'assurer le contrôle de qualité des données et d'archiver toutes les données pluviométriques comparatives, y compris les observations météorologiques connexes et les métadonnées, suivant une structure, de préférence numérique, d'utilisation aisée ;
- (e) de remplir ces fonctions de façon continue pendant dix ans au moins ;
- (f) de mettre à l'essai toutes les méthodes disponibles de correction des mesures relatives à la pluie et aux précipitations solides, en particulier celles mentionnées dans les rapports finaux des comparaisons OMM ;
- (g) d'encourager les travaux de recherche sur les mesures des précipitations. Il n'est pas attendu des centres qu'ils fournissent un service d'étalonnage ou de vérification des instruments. Ils seraient chargés de formuler des recommandations concernant les normes nationales relatives aux observations et d'évaluer les incidences des changement de méthode d'observation sur l'homogénéité des séries chronologiques de données pluviométriques dans la région. Ils serviraient de référence pour l'étalonnage et la validation des observations des précipitations par radar ou d'autre système de télédétection.

ANNEXE 6.B

PROCÉDURES DE CORRECTION SUGGÉRÉES POUR LES MESURES DES PRÉCIPITATIONS

Lors de sa onzième session, qui s'est déroulée en 1994, la Commission des instruments et des méthodes d'observation a formulé, en ce qui concerne la correction des mesures des précipitations, la déclaration ci-après :

Les méthodes de correction sont fondées sur des concepts physiques simplifiés, ce qui a déjà été montré dans la publication OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation (WMO/TD-N° 231). Elles varient en fonction du type de pluviomètre utilisé. On a évalué les effets du vent sur un type donné d'instrument par des mesures comparatives avec les étalons de référence de l'OMM (le pluviomètre enterré pour la pluie et l'instrument de référence et de comparaison à double barrière pour la neige, comme cela est décrit dans la publication OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation (WMO, 1984) et comme le révèlent les résultats préliminaires de la comparaison OMM des mesures des précipitations solides). Il y a lieu d'obtenir la vitesse du vent au niveau de l'ouverture du pluviomètre par la formule suivante :

$$u_{hp} = (\log h z_0^{-1}) \cdot (\log H z_0^{-1})^{-1} \cdot (1 - 0.024\alpha) u_H$$

où : u_{hp} est la vitesse du vent au niveau de l'ouverture de l'instrument ; h la hauteur au-dessus du sol de l'ouverture de l'instrument ; z_0 le coefficient de rugosité : 0,01 m en hiver et 0,03 m en été ; H la hauteur au-dessus du sol de l'instrument de mesure de la vitesse du vent ; u_H la vitesse du vent mesuré à la hauteur H au-dessus du sol ; α l'angle vertical moyen des obstacles autour de l'instrument.

Le dernier paramètre varie suivant l'exposition de l'emplacement de l'instrument; il peut être obtenu soit à partir de la moyenne des mesures directes,

dans les huit directions de la rose des vents compte tenu de l'angle englobant les obstacles dans le plan vertical (360°) autour du pluviomètre, soit par la classification de l'exposition établie à partir des métadonnées conservées dans les archives des Services météorologiques. Les classes sont les suivantes :

<i>Classe</i>	<i>Angle</i>	<i>Description</i>
Site exposé	0–5	Quelques petits obstacles uniquement : arbustes, bosquet, maison
Site principalement exposé	6–12	Petits bosquets ou groupes d'arbustes ou encore une ou deux maisons
Site principalement protégé	13–19	Parcs, orée d'un bois, centre d'un village, ferme, groupe de maisons, jardin
Site protégé	20–26	Jeune forêt, petite clairière, parc avec de grands arbres, centre d'une ville, vallée profonde fermée, terrain très escarpé, sous le vent de grandes collines

Des pertes sont dues au mouillage des parois internes du pluviomètre. Elles varient en fonction de la forme et du matériau de l'appareil, mais aussi du type et de la fréquence des précipitations. A titre d'exemple, pour le pluviomètre de Hellmann, ces pertes atteignent en moyenne 0,3 mm les jours de pluie et 0,15 mm les jours de neige, tandis que, pour le pluviomètre de Tretyakov, ces valeurs moyennes sont respectivement 0,2 et 0,1 mm. Quant aux autres types de pluviomètres, on trouvera des renseignements sur les pertes dues au mouillage des parois dans la publication OMM *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (WMO, 1982).

ANNEXE 6.C

PROCÉDURE NORMALISÉE POUR L'ÉTALONNAGE EN LABORATOIRE DES PLUVIOMÈTRES ENREGISTREURS D'INTENSITÉ DE TYPE RÉCEPTEUR

1. Principes

Le laboratoire d'étalonnage devrait être bien préparé pour l'étalonnage des instruments utilisés dans les pratiques opérationnelles (voir le Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques (OMM N° 8) pour de plus amples informations). Outre un système de référence bien conçu, les procédures d'étalonnage devraient être documentées en détail et précisément énoncées; le personnel devrait avoir reçu toutes les instructions voulues avant le début de toute activité d'étalonnage (pour de plus amples informations, voir la norme ISO 17025). Chaque étalonnage donnera lieu à l'émission d'un certificat présentant les résultats obtenus (y compris les corrections à apporter) et autorisant un contrôle de conformité avec les recommandations pertinentes de l'OMM.

Le certificat devrait également faire état de l'incertitude des mesures de l'intensité. Il devrait établir la traçabilité de la référence, les conditions ambiantes (comme la température) et la méthode utilisée pour calculer les valeurs moyennes dans le temps.

Les pluviomètres enregistreurs d'intensité devraient être étalonnés à l'aide d'un système qui :

- a) A la capacité de générer un écoulement d'eau constant à différentes valeurs de débit correspondant à la gamme de mesures opérationnelles complète (gamme recommandée : de 0,2 mm h⁻¹ à 2 000 mm h⁻¹) ;
- b) Est capable de mesurer le débit en évaluant la quantité d'eau sur une période donnée ;
- c) Est capable de mesurer la valeur de sortie de l'instrument étalonné à intervalle régulier ou à chaque impulsion, aspect typique de la majorité des pluviomètres à augets basculeurs.

2. Exigences

- a) Le système d'étalonnage devrait être conçu pour obtenir des incertitudes inférieures à 1 % pour l'intensité des précipitations, et ces performances devraient être décrites en détail ;
- b) Dans le cas des pluviomètres enregistreurs à augets basculeurs (TBRG), il faudrait vérifier le

- c) basculement des augets afin d'assurer une variation minimale lors du processus de mesure ;
- d) Il faudrait avoir recours à au moins cinq intensités de référence judicieusement réparties pour couvrir la totalité de la gamme de fonctionnement de l'instrument ;
- e) Le nombre de réglages de référence devrait être assez grand pour établir une courbe d'ajustement par interpolation. Ces réglages de référence devraient être choisis et répartis de manière à pouvoir déterminer par interpolation la courbe d'étalonnage pour que l'incertitude de la courbe d'ajustement soit inférieure à l'incertitude des mesures permise pour la totalité de la gamme de fonctionnement ;
- f) Le débit est calculé à partir des mesures de la masse et du temps ;
- g) La mesure de la masse est meilleure que 0,1 % ;
- h) Tous les essais devraient durer assez longtemps pour garantir une incertitude inférieure à 1 % dans les mesures de l'intensité ;
- i) La résolution temporelle maximale pour les mesures de l'intensité devrait être d'une seconde ;
- j) Les conditions ci-après doivent être respectées si l'on veut limiter les sources d'erreurs dans toutes les activités de laboratoire connexes :
 - Bien définir la qualité/pureté de l'eau désirée pour l'étalonnage ;
 - Accorder une priorité à la reproductibilité des conditions d'étalonnage ;
 - Utiliser un équipement de contrôle et d'enregistrement adéquat (contrôle sur PC par exemple) ;
 - Disposer de systèmes d'acquisition présentant une compatibilité électromagnétique afin d'éviter les impulsions parasites ;
- k) La quantité généralement indiquée pour les précipitations est la hauteur exprimée en millimètres, quoique les pluviomètres à pesée mesurent la masse. Étant donné que la masse volumique de la pluie varie en fonction de la température ambiante, le rapport entre la masse et la hauteur équivalente des précipitations introduit une imprécision dont on doit tenir compte au cours de l'étalonnage et du calcul de l'incertitude ;
- l) Les conditions ambiantes au cours de chaque étalonnage doivent être notées et consignées :

- Date et heure (début/fin) ;
 - Température de l'air [°C] ;
 - Température de l'eau [°C] ;
 - Pression atmosphérique [hPa] ;
 - Humidité relative ambiante [%] ;
 - Toute autre condition pouvant avoir un effet sur l'étalonnage (par exemple vibrations) ;
 - Pertes attribuables à l'évaporation [mm] ;
- l) Le nombre d'essais réalisés avec chaque instrument, leur description en termes d'unités de temps et/ou le nombre de basclements doivent être indiqués.

3. Procédure pour l'interprétation des données

- a) Les résultats doivent être présentés sous forme d'un graphique présentant l'erreur relative par rapport à l'intensité de référence. L'erreur relative est évaluée comme suit pour chaque débit de référence :

$$e = \frac{I_m - I_r}{I_r} \cdot 100\%$$

où I_m représente l'intensité mesurée par l'instrument et I_r est l'intensité de référence fournie pour l'instrument ;

- b) En principe cinq essais, mais jamais moins de trois, doivent être réalisés pour chaque série d'intensités de référence, de façon à pouvoir associer cinq chiffres d'erreur à chaque instrument. L'erreur moyenne et les valeurs moyennes de I_r et I_m sont obtenues en rejetant les valeurs minimale et maximale de e obtenues pour chaque débit de référence, puis en évaluant les trois erreurs et valeurs d'intensité de référence restantes. Pour chaque intensité de référence, il faut indiquer une marge d'erreur englobant les cinq valeurs d'erreur utilisées pour calculer les moyennes ;
- c) De plus, on peut représenter I_r en fonction de I_m , où I_m et I_r sont des valeurs moyennes, calculées selon les indications ci-dessus; toutes les données sont ajustées dans une courbe d'interpolation, qui correspond à la courbe du meilleur ajustement (les courbes polynomiales linéaires, à fonction exponentielle ou du second ordre sont acceptables) ;
- d) Les limites de $\pm 5\%$ doivent figurer dans les graphiques présentant les résultats, afin de

- pouvoir facilement comparer les résultats obtenus avec les recommandations de l'OMM ;
- e) Si l'eau commence à être emmagasinée à une intensité inférieure à l'intensité maximale déclarée, il faut indiquer cette première intensité sur le certificat d'étalonnage et ne pas considérer les valeurs qui lui sont supérieures ;
- f) Outre les mesures fondées sur des débits constants, il faut déterminer la réaction par paillier de chaque instrument qui n'est pas un pluviomètre à augets basculeurs. Celle-ci doit être mesurée en passant d'un débit constant à un autre, à savoir de 0 mm h^{-1} à l'intensité de référence puis de retour à 0 mm h^{-1} . Le débit constant doit être appliqué jusqu'à ce que le signal de sortie de l'instrument soit stabilisé, c'est-à-dire lorsque les variations aux fluctuations de l'intensité établie peuvent être négligées par rapport à l'incertitude de mesure connue du système de référence. Il faut effectuer au moins un échantillonnage à la minute lorsque l'instrument le permet. Le temps écoulé avant la stabilisation est considéré comme correspondant au délai de mesure de l'intensité de référence de l'instrument. Un délai de moins d'une minute est requis pour une mesure exacte de l'intensité. Le temps de réaction doit toujours figurer dans le certificat d'étalonnage.

4. Calcul de l'incertitude

les sources suivantes d'incertitude doivent être considérées et quantifiées :

- a) Générateur de débit: incertitude concernant la constance du débit due à des variations possibles dans le mécanisme du générateur, y compris des différences de pression dans le réservoir d'eau et les tuyaux de distribution ;
- b) Dispositifs de mesure du débit (de référence et à étalonner) : incertitudes attribuables à l'appareil de pesée, à la mesure du temps, à des délais dans l'acquisition et le traitement des données, ainsi qu'à des variations des conditions expérimentales et ambiantes, notamment la température et l'humidité relative.

Ces deux sources d'incertitude sont indépendantes l'une de l'autre; on peut donc effectuer des analyses distinctes et combiner les résultats dans le bilan de l'incertitude.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Armstrong, R.L., 1976 : The application of isotopic profiling snow-gauge data to avalanche research. *Proceedings of the Forty-fourth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 12–19.
- Goodison, B.E., J.R. Metcalfe, R.A. Wilson and K. Jones, 1988 : The Canadian automatic snow depth sensor: A performance update. *Proceedings of the Fifty-sixth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 178–181.
- Goodison, B.E., B. Sevruk, and S. Klemm, 1989 : WMO solid precipitation measurement intercomparison: Objectives, methodology and analysis. In: International Association of Hydrological Sciences, 1989: *Atmospheric deposition. Proceedings*, Baltimore Symposium (May, 1989) IAHS Publication No. 179, Wallingford.
- Grunow, J., 1960 : The productiveness of fog precipitation in relation to the cloud droplet spectrum. In: American Geophysical Union, 1960, *Physics of precipitation*. Geophysical Monograph No. 5, *Proceedings of the Cloud Physics Conference* (3–5 June 1959, Woods Hole, Massachusetts), Publication No. 746, pp. 110–117.
- Grunow, J., 1963 : *Weltweite Messungen des Nebelniederschlags nach der Hohenpeissenberger Methode*. In: International Union of Geodesy and Geophysics, General Assembly (Berkeley, California, 19–31 August 1963), International Association of Scientific Hydrology Publication No. 65, 1964, pp. 324–342.
- Loijens, H.S., 1975 : Measurements of snow water equivalent and soil moisture by natural gamma radiation. *Proceedings of the Canadian Hydrological Symposium-75* (11–14 August 1975, Winnipeg), pp. 43–50.
- Nespor, V. and B. Sevruk, 1999 : Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 16, Number 4, pp. 450–464.
- Organisation météorologique mondiale, 1996 : Guide des pratiques hydrologiques. Cinquième édition, OMM-N° 168, Genève.
- Rinehart, R.E., 1983: Out-of-level instruments : Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, pp. 1404–1410.
- Schemenauer, R.S. and P. Cereceda, 1991 : Fog water collection in arid coastal locations. *Ambio*, Volume 20, Number 7, pp. 303–308.
- Schemenauer, R.S. and P. Cereceda, 1994a : Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum*, Volume 18, Number 2, pp. 91–100.
- Schemenauer, R.S. and P. Cereceda, 1994b : A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 33, Number 11, pp. 1313–1322.
- Sevruk, B., 1974a : Correction for the wetting loss of a Hellman precipitation gauge. *Hydrological Sciences Bulletin*, Volume 19, Number 4, pp. 549–559.
- Sevruk, B., 1974b : Evaporation losses from containers of Hellman precipitation gauges. *Hydrological Sciences Bulletin*, Volume 19, Number 2, pp. 231–236.
- Sevruk, B., 1984 : Comments on “Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements”. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, pp. 988–989.
- Sevruk, B. and V. Nespor, 1994 : The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error. In: M. Desbois and F. Desalmand (eds.): *Global Precipitation and Climate Change*, NATO ASI Series, I26, Springer Verlag, Berlin, pp. 231–246.
- Sevruk, B. and L. Zahlavova, 1994 : Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application. *International Journal of Climatology*, 14(b), pp. 681–689.
- Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993 : Precipitation measurement and quality control. *Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation* (B. Sevruk and M. Lapin, eds) (Bratislava, 20–24 September 1993), Volume I, Bratislava and Zurich.
- Smith, J.L., H.G. Halverson, and R.A. Jones, 1972 : *Central Sierra Profiling Snowgauge: A Guide to Fabrication and Operation*. USAEC Report TID-25986, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Washington DC.
- Stadtmuller, T. and N. Agudelo, 1990 : Amount and variability of cloud moisture input in a tropical cloud forest. In: *Proceedings of the Lausanne Symposia* (August/November), IAHS Publication No. 193, Wallingford.
- Vong, R.J., J.T. Sigmon and S.F. Mueller, 1991 : Cloud water deposition to Appalachian forests. *Environmental Science and Technology*, 25(b), pp. 1014–1021.
- World Meteorological Organization, 1972 : Evaporation losses from storage gauges (B. Sevruk) *Dis-*

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- tribution of Precipitation in Mountainous Areas*, Geilo Symposium (Norway, 31 July–5 August 1972), Volume II, technical papers, WMO-No. 326, Geneva, pp. 96–102.
- World Meteorological Organization, 1982 : *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 21, WMO-No. 589, Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1984 : *International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge* (B. Sevruk and W.R. Hamon). Instruments and Observing Methods Report No. 17, WMO/TD-No. 38, Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1985 : *International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison*. Final report of the first session (distributed to participants only), Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1986 : *Papers Presented at the Workshop on the Correction of Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (Zurich, Switzerland, 1–3 April 1985). Instruments and Observing Methods Report No. 25, WMO/TD-No. 104, Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1989a : *Catalogue of National Standard Precipitation Gauges* (B. Sevruk and S. Klemm). Instruments and Observing Methods Report No. 39, WMO/TD-No. 313, Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1989b : *International Workshop on Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (St Moritz, Switzerland, 3–7 December 1989). Instruments and Observing Methods Report No. 48, WMO/TD-No. 328, Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1992a : *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruk, ed.). Operational Hydrology Report No. 35, WMO-No. 749, Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1992b : *Report on the Measurement of Leaf Wetness* (R.R. Getz). Agricultural Meteorology Report No. 38, WMO/TD-No. 478, Geneva.
 - World Meteorological Organization, 1998 : *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison : Final Report* (B.E. Goodison, P.Y.T. Louie and D. Yang) Instruments and Observing Methods Report No. 67, WMO/TD-No. 872, Geneva.
 - Yang, D., J.R. Metcalfe, B.E. Goodison, and E. Meekis, 1993, True Snowfall : An evaluation of the Double Fence Intercomparison Reference Gauge : *Proc. 50th Eastern Snow Conference*, Quebec City, QC, p. 105–111.
- Yang, D., BE Goodison, JR Metcalfe, VS Golubev, E Elomaa, T Gunther, R Bates, T Pangburn, CL Hanson, D Emerson, V Copaciu, and J Milkovic, 1995, Accuracy of Tretyakov precipitation gauge : Results of WMO intercomparison : *Hydrological Processes*, v. 9, p. 877–895
- Young, G.J., 1976 : A portable profiling snow-gauge : Results of field tests on glaciers. *Proceedings of the Forty-fourth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 7–11.

CHAPITRE 7

MESURE DU RAYONNEMENT

7.1 GÉNÉRALITÉS

Les différents flux de rayonnement reçus ou émis par la surface terrestre constituent les termes parmi les plus importants dans l'économie thermique de l'ensemble du globe et de n'importe quel point de la surface terrestre et de l'atmosphère. Les mesures du rayonnement servent aux fins suivantes :

- a) Étudier les transformations de l'énergie dans le système Terre atmosphère et ses variations dans le temps et dans l'espace ;
- b) Analyser les propriétés et la distribution des constituants de l'atmosphère: aérosols, vapeur d'eau, ozone, etc. ;
- c) Étudier la distribution et les variations des rayonnements incident, sortant et total résultant ;
- d) Répondre aux besoins de la biologie, de la médecine, de l'agriculture, de l'architecture et de l'industrie en matière de rayonnement ;
- e) Vérifier les mesures du rayonnement effectuées par satellite, ainsi que leurs algorithmes de traitement des résultats.

De telles applications requièrent des séries régulières de données sur les composantes du rayonnement solaire et terrestre en surface, collectées par un vaste réseau d'observation, ainsi que la dérivation de mesures représentatives du rayonnement total résultant. Parallèlement à la publication des séries de valeurs recueillies par les diverses stations d'observation, il faut impérativement établir des climatologies très complètes du rayonnement, afin d'évaluer avec plus d'exactitude les variations quotidiennes et saisonnières des différentes composantes radiatives du bilan thermique général et de mieux comprendre leurs relations avec les autres éléments météorologiques.

On trouvera, dans la publication de l'OMM (1986a), des informations très utiles sur le fonctionnement et la conception des réseaux de stations radiométriques. La Partie III du Guide de la CIMO décrit les principes scientifiques sur lesquels reposent les mesures et donne des indications sur le contrôle qualité qui est capital dans le cas des mesures du rayonnement. Afin d'obtenir un aperçu des progrès les plus récents accomplis dans le domaine, on se reportera à la publication Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual (OMM, 1998).

Conformément à la pratique courante dans ce domaine, les erreurs et les incertitudes sont exprimées dans le présent chapitre sous la forme d'un inter-

valle de confiance à 66 pour cent quant à l'écart par rapport à la valeur réelle, ce qui correspond à l'écart type de la population de valeurs. On indique au besoin des intervalles de confiance pour certaines incertitudes et ces dernières sont évaluées à l'aide de la méthode de l'Organisation internationale de normalisation (ISO, 1995). Par exemple, une incertitude à 95 pour cent implique que cette incertitude est liée à un intervalle de confiance à 95 pour cent.

7.1.1 Définitions

À l'annexe 7.A figure une nomenclature des grandeurs du rayonnement, notamment celles qui servent aux applications photométriques et optiques. Elle est fondée sur les définitions recommandées par la Commission internationale des rayonnements de l'Association internationale de météorologie et de physique de l'atmosphère et par la Commission internationale de l'éclairage (CIE). L'annexe 7.B donne les grandeurs météorologiques du rayonnement, avec les symboles et les définitions associées.

Les grandeurs du rayonnement sont généralement classées en deux groupes selon leur origine: rayonnement solaire et rayonnement terrestre. Dans le contexte du présent chapitre, le «rayonnement» peut être lié à un processus ou s'appliquer à des multiples grandeurs. Par exemple, le «rayonnement solaire» peut faire référence à l'énergie solaire, à l'exposition solaire ou l'éclairement énergétique du Soleil (voir l'annexe 7.B).

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique émise par le Soleil. Le rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère est appelé rayonnement solaire extraterrestre; 97 pour cent de celui-ci est compris dans le domaine spectral 290 - 3 000 nm, et correspond à ce que l'on appelle rayonnement solaire (parfois rayonnement de courtes longueurs d'onde). Une partie du rayonnement solaire extraterrestre traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, tandis qu'une autre partie est diffusée et/ou absorbée dans l'atmosphère par les molécules gazeuses, les particules d'aérosols, les gouttelettes d'eau et cristaux de glace présents dans les nuages.

Le rayonnement terrestre est l'énergie électromagnétique de grandes longueurs d'onde émise par la surface terrestre et par les gaz, aérosols et nuages atmosphériques; ce rayonnement est lui aussi partiellement absorbé dans l'atmosphère. À la tempé-

rature de 300 K, 99,99 pour cent de la puissance du rayonnement terrestre se distribue selon des longueurs d'onde supérieures à 3 000 nm, et environ 99 pour cent selon des longueurs d'onde supérieures à 5 000 nm. À des températures inférieures, le spectre radiatif est décalé vers des longueurs d'onde plus grandes.

Étant donné que les distributions spectrales des rayonnements solaire et terrestre ne se recoupent que très peu, ceux-ci sont souvent considérés séparément tant dans les mesures que dans les calculs. En météorologie, la somme de ces deux rayonnements est appelée «rayonnement total».

La lumière est le rayonnement visible, soit celui qui est perceptible par l'œil humain. Le domaine spectral du rayonnement visible est défini par l'efficacité lumineuse spectrale pour un observateur de référence. La limite inférieure est comprise entre 360 et 400 nm et la limite supérieure entre 760 et 830 nm (CIE, 1987). Le rayonnement de longueurs d'onde inférieures à 400 nm est appelé ultraviolet, celui supérieur à 730 nm infrarouge. Le domaine ultraviolet est parfois subdivisé en trois régions (CEI, 1987) :

UV-A : 315–400 nm

UV-B : 280–315 nm

UV-C : 100–280 nm

7.1.2 Unités et échelles

7.1.2.1 Unités

Pour représenter les grandeurs météorologiques du rayonnement, le Système international d'unités (SI) est nettement préférable. On trouvera une liste générale des unités dans les annexes 7.A et 7.B.

7.1.2.2 Normalisation

La responsabilité de l'étalonnage des instruments radiométriques incombe aux centres radiométriques mondiaux, régionaux et nationaux, dont les spécifications sont données à l'annexe 7.C. Le Centre radiométrique de Davos est en outre chargé de conserver la référence de base constituée par le Groupe étalon mondial (GEM) d'instruments, utilisé pour établir la Référence radiométrique mondiale (RRM). Au cours des comparaisons internationales, organisées tous les cinq ans environ, les instruments étalons des centres régionaux sont comparés avec le GEM et leurs facteurs d'étalonnage sont ajustés par rapport à la RRM. Ces instruments sont employés, à leur tour, périodiquement pour le transfert de la RRM aux centres nationaux, en vue d'assurer l'étalonnage des instruments de réseau à partir des étalons nationaux.

Définition de la Référence radiométrique mondiale

Dans le passé, différentes références ou échelles radiométriques ont été utilisées en météorologie: l'échelle d'Ångström de 1905, l'échelle de la Smithsonian de 1913 et l'échelle pyrhéliométrique internationale de 1956 (IPS ou EPI 1956). Les progrès accomplis ces dernières années dans le domaine de la radiométrie absolue ont permis de réduire sensiblement l'incertitude qui entache les mesures du rayonnement. Les résultats de nombreuses comparaisons entre 15 pyrhéliomètres absolus de 10 types différents ont servi de base à la définition de la Référence radiométrique mondiale (RRM). Le passage des anciennes échelles à la RRM s'effectue à l'aide des facteurs suivants :

$$\frac{\text{RRM}}{\text{Échelle d'Ångström 1905}} = 1.026$$

$$\frac{\text{RRM}}{\text{Échelle de la Smithsonian 1913}} = 0.977$$

$$\frac{\text{RRM}}{\text{EPI ou IPS 1956}} = 1.022$$

Il est admis que la RRM représente les unités physiques de l'éclairement énergétique total à 0,3 pour cent près (incertitude à 99 pour cent de la valeur mesurée).

Matérialisation de la RRM : le Groupe étalon mondial (GEM)

Un ensemble d'instruments appelé Groupe étalon mondial et comprenant au moins quatre pyrhéliomètres absolus de conception différente garantit la stabilité à long terme de la nouvelle référence. Lors de son intégration dans le groupe, chaque instrument est doté d'un facteur de correction destiné à aligner les lectures sur la RRM. Pour faire partie du groupe, un radiomètre doit remplir les conditions suivantes :

- a) Conserver, sur plusieurs décennies, une stabilité supérieure à 0,2 pour cent de la valeur mesurée ;
- b) Présenter une incertitude (95 pour cent) de la série de mesures effectuées conforme aux limites d'incertitude de la RRM ;
- c) Être d'une autre conception que les radiomètres appartenant déjà au GEM.

Les instruments du groupe sont comparés entre eux au moins une fois par an, afin de vérifier que leur stabilité reste bien conforme à la norme fixée, raison pour laquelle ils se trouvent au Centre radiométrique mondial (CRM) de Davos.

Calcul des valeurs de la RRM

Pour étalonner un radiomètre, il faut se référer aux lectures d'un des instruments du GEM, ou d'un instrument directement étalonné par l'intermédiaire de la chaîne de raccordement au GEM. Au cours des comparaisons internationales de pyrhéliomètres (IPC), la valeur de la RRM s'obtient en calculant la moyenne des mesures fournies par au moins trois des instruments du GEM. Les valeurs représentatives de la RRM sont toujours établies en appliquant aux lectures de chaque instrument du GEM le facteur d'alignement qui lui a été assigné au moment de son incorporation dans le groupe. Étant donné que le calcul de cette moyenne servant de référence peut être faussé par le mauvais fonctionnement d'un ou plusieurs radiomètres du GEM, la Commission des instruments et des méthodes d'observation a décidé¹ que lors de chaque comparaison, il faudrait mettre sur pied un groupe spécial composé du rapporteur pour les mesures de rayonnement à caractère météorologique (ou un remplaçant désigné) et d'au moins cinq membres, dont le président. Le directeur de la comparaison doit participer aux réunions du groupe à titre d'expert. Le groupe devrait discuter des résultats préliminaires de la comparaison, à partir des critères définis par le Centre radiométrique mondial, évaluer la référence et recommander l'actualisation des facteurs d'étalonnage.

7.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

7.1.3.1 Données à enregistrer

L'éclairement énergétique et l'exposition énergétique sont les grandeurs les plus couramment enregistrées et archivées, sous forme de moyennes et de totaux calculés sur une heure. Les données portant sur des périodes plus courtes, pouvant se réduire à une minute et à des fractions de minute (pour certaines applications énergétiques) sont aussi utilisées fréquemment. Les totaux quotidiens sont aussi abondamment employés, mais ils sont exprimés en éclairement énergétique quotidien moyen. Les mesures de l'extinction atmosphérique doivent être faites avec des temps de réponse très courts afin de réduire les incertitudes associées aux variations des masses d'air.

Dans le cas des mesures du rayonnement, il est particulièrement important d'enregistrer et de communiquer des informations sur les circonstances dans lesquelles se sont déroulées les observations, notamment le type d'instrument et sa traçabilité, la mé-

thode d'étalonnage, l'emplacement dans le temps et l'espace, l'exposition spatiale et la fiche d'entretien.

7.1.3.2 Incertitude

Pour ce qui est de la plupart des grandeurs de rayonnement, les exigences en matière d'incertitude n'ont pas été officiellement établies, mais on trouve des informations à cet égard dans les sections du présent chapitre consacrées aux divers types de mesures; on a par ailleurs défini des meilleures pratiques pour le Réseau de référence pour la mesure du rayonnement en surface du Système mondial d'observation du climat (voir OMM, 1998). De manière générale, on peut dire qu'il est difficile d'obtenir des mesures de qualité dans la pratique; et pour l'exploitation courante, elles nécessitent un équipement moderne et des mesures répétées. Quelques systèmes de mesure encore utilisés ne donnent pas de résultats optimaux, des données de qualité inférieure ayant été acceptables pour de nombreuses applications. Cependant, les besoins en matière de données répondant aux normes de qualité les plus élevées ne cessent d'augmenter.

On trouvera à l'annexe 1.B les exigences en matière d'incertitude pour le rayonnement total résultant et l'exposition énergétique. En ce qui concerne l'exposition énergétique pour une journée, les exigences de l'OMM (incertitude à 95 pour cent) pour les mesures destinées aux échanges internationaux sont de $0,4 \text{ MJ m}^{-2}$ pour des valeurs $\leq 8 \text{ MJ m}^{-2}$ et 5 pour cent pour $> 8 \text{ MJ m}^{-2}$.

7.1.3.3 Échantillonnage et enregistrement

Pour limiter l'incertitude aux niveaux requis, l'idéal est de procéder à des observations à une fréquence plus élevée que la constante de temps, $1/e$, de l'instrument, même si les données qui seront finalement enregistrées sont des totaux intégrés sur des périodes d'une heure ou plus. Les données simples peuvent être des totaux intégrés ou un flux moyen calculé à partir d'échantillons individuels. Les systèmes de données numériques sont de loin ceux qui conviennent le mieux. Les enregistreurs graphiques et autres types d'intégrateurs sont beaucoup moins pratiques et donnent des résultats qu'il est difficile de maintenir en conformité avec les exigences en matière d'incertitude.

7.1.3.4 Temps de référence

Dans un réseau mondial de mesure du rayonnement, il est important que les données soient non seulement homogènes sous l'angle de l'étalonnage, mais également exprimées par rapport au même temps de référence. Aussi, toutes les mesures de rayonnement devraient se rapporter à ce que l'on appelle dans certains pays le temps local apparent (TLA) et, dans d'autres, le temps solaire vrai (TSV).

¹ Résolution de la Commission à sa onzième session (1994).

Tableau 7.1. Radiomètres météorologiques

<i>Classification des instruments</i>	<i>Paramètres à mesurer</i>	<i>Principale utilisation</i>	<i>Angle de vision (sr) (voir figure 7.1)</i>
Pyrhéliomètre absolu	Rayonnement solaire direct	Étalon primaire	5×10^{-3} (approx. $2,5^\circ$ de demi-angle)
Pyrhéliomètre	Rayonnement solaire direct	a) Étalon secondaire b) Réseau	5×10^{-3} à $2,5 \times 10^{-2}$
Pyrhéliomètre spectral	Rayonnement solaire direct dans de larges bandes passantes (en partie, avec filtres OG 530, RG 630, etc.)	Réseau	5×10^{-3} à $2,5 \times 10^{-2}$
Héliophotomètre	Rayonnement solaire direct dans d'étroites bandes passantes (en partie, à $500 \pm 2,5$ nm, $368 \pm 2,5$ nm)	a) Étalon b) Réseau	1×10^{-3} à 1×10^{-2} (approx. $2,3^\circ$ angle d'ouverture)
Pyranomètre	a) Rayonnement (solaire) global b) Rayonnement (solaire) diffus c) Rayonnement solaire réfléchi	a) Étalon de travail b) Réseau	2π
Pyranomètre spectral	Rayonnement (solaire) global dans de larges bandes passantes (en partie, avec filtres OG 530, RG 630, etc)	Réseau	2π
Pyranomètre différentiel	Bilan du rayonnement (solaire) global	a) Étalon de travail b) Réseau	4π
Pyrgéomètre	a) Rayonnement ascendant de grandes longueurs d'onde b) Rayonnement descendant de grandes longueurs d'onde	Réseau	2π
Pyrradiomètre	Rayonnement total	Étalon de travail	2π
Pyrradiomètre différentiel	Bilan du rayonnement total	Réseau	4π

L'emploi du temps légal ou universel est, certes, intéressant, parce que plus commode, pour les systèmes automatiques, mais il ne peut être accepté que si la réduction des données en TSV n'entraîne pas une perte significative d'informations (c'est-à-dire si la fréquence d'échantillonnage et de collecte est suffisamment élevée, comme il est indiqué au paragraphe 7.1.3.3). On trouvera à l'annexe 7.D les formules applicables pour convertir le temps légal en temps solaire.

7.1.4 Méthodes de mesure

Les radiomètres météorologiques peuvent être classés selon différents critères: le type de grandeur à mesurer, l'angle d'ouverture, la réponse spectrale,

l'utilisation courante, etc. On trouvera au tableau 7.1 ci-après les plus importants types de classifications. La qualité des instruments est caractérisée par les éléments a) à h) ci-après. Les instruments et leur fonctionnement sont décrits dans les sections 7.2 à 7.4. Pour plus de détails sur les instruments et les principes de fonctionnement appliqués, on se reporterà à la publication de l'OMM (1986a).

Les radiomètres absous s'auto étalonnent, c'est-à-dire qu'une puissance électrique mesurable avec une grande exactitude s'y substitue au flux de rayonnement incident. La substitution ne pouvant cependant pas être absolument parfaite, l'écart par rapport au cas idéal détermine l'incertitude de la mesure du rayonnement.

La plupart des capteurs de rayonnement ne sont toutefois pas absous et doivent être étalonnés par rapport à un instrument absolu. L'incertitude des mesures dépend alors des facteurs ci-après, qui devraient tous être connus dans le cas d'un instrument dont les caractéristiques techniques sont bien établies :

- a) La résolution, caractérisée par le plus petit changement de la quantité de rayonnement susceptible d'être détectée par l'instrument ;
- b) La dérive de sensibilité dans le temps (c'est-à-dire le rapport du signal électrique de sortie à l'éclairement énergétique incident) ;
- c) Les variations de sensibilité en fonction des fluctuations des variables de l'environnement telles que la température, l'humidité, la pression, le vent, etc. ;
- d) La non-linéarité de la réponse, à savoir les changements de sensibilité associés aux variations de l'éclairement énergétique ;
- e) L'écart de la réponse spectrale par rapport à un état initial, par exemple le noircissement de la surface réceptrice, l'effet de la fenêtre d'ouverture, etc. ;
- f) L'écart de la réponse angulaire par rapport à la valeur attendue, à savoir la réponse en cosinus et la réponse en azimut ;
- g) La constante de temps de l'instrument ou du système de mesure ;
- h) Les incertitudes des équipements auxiliaires.

Les instruments doivent être choisis en fonction de leur utilisation finale et des exigences en matière d'incertitude des valeurs dérivées. Certains instruments sont mieux adaptés à tels ou tels climats, éclairages énergétiques et positions du Soleil.

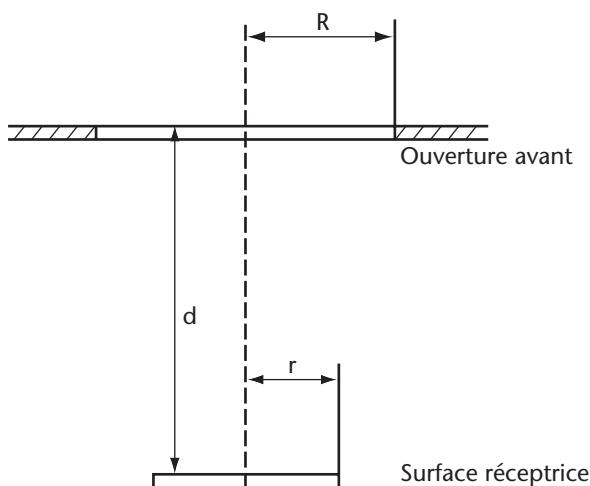


Figure 7.1.
Ouverture angulaire (géométrie). Demi-angle d'ouverture : $\text{arc tg } R/d$. Angle de pente : $\text{arc tg } (R-r)/d$.

7.2

MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT

Le rayonnement solaire direct se mesure à l'aide de pyrhéliomètres orientés de manière telle que leurs surfaces réceptrices soient perpendiculaires au faisceau solaire direct. En jouant avec les ouvertures, on peut ne mesurer que le seul rayonnement provenant du disque solaire et d'une zone annulaire étroite de ciel circumsolaire; on parle dans ce dernier cas d'un rayonnement circumsolaire. Les instruments modernes interceptent cette zone sous un demi angle de $2,5^\circ$ ou de 5° à partir du centre du disque solaire (soit sous un angle solide de $6 \cdot 10^{-3}$ et $2,4 \cdot 10^{-2}$ stéradians (sr)). La monture du pyrhéliomètre doit permettre d'assurer des réglages en hauteur et en azimut rapides et aisés. L'instrument comporte habituellement un dispositif de visée, agencé de façon qu'un petit point lumineux (image solaire) tombe sur un repère situé au centre de la cible quand la surface réceptrice est exactement perpendiculaire au faisceau solaire direct. Pour des enregistrements continus, il est conseillé d'utiliser des mécanismes automatiques de poursuite du Soleil.

Pour les nouveaux instruments, il est recommandé d'adopter comme demi angle d'ouverture une valeur de $2,5^\circ$ ($6 \cdot 10^{-3}$ sr) et comme angle de pente une valeur de 1° . Ces angles sont définis à la figure 7.1.

Durant la comparaison d'instruments avec différentes ouvertures angulaires, il ne faut pas oublier que le rayonnement circumsolaire influencera les lectures d'une manière plus importante pour des angles de pente et d'ouverture plus élevés. Pour une masse d'air de 1,0, l'écart entre les deux ouvertures mentionnées peut atteindre 2 pour cent. Afin de rendre possibles les comparaisons climatologiques du rayonnement solaire direct durant les différentes saisons, il peut être nécessaire de rapporter toutes les données à la distance moyenne Terre Soleil :

$$E_N = E/R^2 \quad (7.1)$$

où E_N est le rayonnement solaire normalisé à la distance moyenne Terre Soleil, définie comme une unité astronomique (UA) (voir annexe 7.D), E est le rayonnement solaire direct mesuré et R est la distance Terre Soleil en unités astronomiques.

7.2.1

Rayonnement solaire direct

Le tableau 7.2 (dérivé de la norme ISO, 1990a) décrit certaines des caractéristiques des pyrhéliomètres opérationnels (autres que les étalons primaires), et donne des estimations des incertitudes des mesures effectuées à l'aide de ces instruments pour autant qu'ils soient utilisés par un personnel compétent

et qu'ils fassent l'objet d'un contrôle qualité. Des instruments meilleur marché sont disponibles (voir ISO, 1990a), mais si leur réponse est plus lente, l'incertitude qui en résulte réduit la qualité des données, et le coût d'un dispositif de poursuite du Soleil, qui est nécessaire aux mesures du faisceau direct, ne serait pas justifié par rapport au coût de l'achat d'un pyrhéliomètre de qualité. Les incertitudes estimées sont fondées sur les hypothèses suivantes :

- a) Les instruments sont bien entretenus, correctement alignés et propres ;
- b) Les chiffres données toutes les minutes et toutes les heures concernent les rayonnements par temps clair à midi ;
- c) Les valeurs quotidiennes d'exposition concernent les jours dégagés à des latitudes moyennes.

7.2.1.1 Pyrhéliomètres étalons primaires

Un pyrhéliomètre absolu peut définir l'échelle d'éclairement énergétique total sans avoir besoin de se référer à des sources ou à des émetteurs de référence. Les limites d'incertitude de la définition doivent être connues; le degré de finesse de cette connaissance détermine la fiabilité d'un pyrhéliomètre absolu. Seuls des laboratoires spécialisés devraient exploiter et entretenir les étalons primaires. Pour une description détaillée de leur fabrication et de leur fonctionnement, on se reportera à la publication de l'OMM (1986a). Un bref aperçu est toutefois donné ci-après.

Tous les pyrhéliomètres absolus de conception moderne utilisent comme récepteurs des cavités et comme capteurs des fluxmètres thermiques différentiels étalonnés électriquement. À ce jour, cette combinaison présente le plus faible degré possible d'incertitude pour les valeurs couvertes par les mesures du rayonnement solaire (jusqu'à $1,5 \text{ kW m}^{-2}$).

L'étalonnage électrique s'effectue normalement en substituant à la puissance du rayonnement une puissance électrique qui se dissipe dans une bobine placée le plus près possible de l'endroit où se produit l'absorption du rayonnement solaire.

On détermine l'incertitude des mesures effectuées par l'instrument en examinant méticuleusement ses caractéristiques et en procédant à des mesures en laboratoire et/ou à des calculs au moyen de modèles pour établir les écarts par rapport à ce qui serait le fonctionnement idéal, autrement dit pour savoir à quel point la substitution électrique s'approche de la perfection. C'est ce que l'on appelle la caractérisation de l'instrument.

Avant de choisir et d'employer comme étalon primaire un pyrhéliomètre absolu (un instrument individuel, non un type), il faut s'assurer que les conditions suivantes sont bien remplies :

Tableau 7.2.
Caractéristiques des pyrhéliomètres opérationnels

Caractéristique	Qualité supérieure ^a	Bonne qualité ^b
Temps de réponse (95% du signal)	< 15 s	< 30 s
Décalage du zéro (réponse à un changement de la température ambiante de 5 K h^{-1})	2 W m^{-2}	4 W m^{-2}
Résolution (plus petite variation détectable en W m^{-2})	0,51	1
Stabilité (pourcentage à fond d'échelle, changement par an)	0,1	0,5
Réponse en température (erreur maximale en pourcentage due au changement de la température ambiante dans un intervalle de 50 K)	1	2
Non-linéarité (écart en pourcentage de la sensibilité à 500 W m^{-2} dû à une différence d'éclairement énergétique entre 100 W m^{-2} et $1\,100 \text{ W m}^{-2}$)	0,2	0,5
Sensibilité spectrale (écart en pourcentage du produit du coefficient d'absorption spectrale par le facteur de transmission spectrale par rapport à la moyenne correspondante entre 300 et 3 000 nm)	0,5	1,0
Réponse en inclinaison (écart en pourcentage par rapport à la sensibilité à 0° d'inclinaison dû à un changement d'inclinaison compris entre 0° et 90° pour un éclairement énergétique de $1\,000 \text{ W m}^{-2}$)	0,2	0,5
Incertitude possible, 95% du niveau de confiance (voir ci-dessus)		
Taux pour une minute	% kj m ⁻²	0,9 0,56
Taux pour une heure	% kj m ⁻²	0,7 21
Taux journaliers	% kj m ⁻²	0,5 200
		1,8 1
		1,5 54
		1,0 400

Notes :

a) Instrument quasiment à la pointe du progrès ; peut servir d'étalon de travail ; ne peut être entretenu qu'aux stations dotées de personnel et d'installations spécialisées.

b) Qualité suffisante pour l'exploitation du réseau.

- a) Lors de la fabrication d'une série de radiomètres, au moins un des instruments de la série doit être complètement caractérisé. L'incertitude à 95 pour cent de la caractérisation devrait être inférieure à 2 W m^{-2} dans des conditions de ciel clair propices à l'étalonnage (voir ISO, 1990a). Pour une série de mesures, l'incertitude à 95 pour cent (pour toutes ses composantes) ne devrait pas dépasser 4 W m^{-2} quelle que soit la valeur mesurée ;

- b) Chaque instrument de la série devrait ensuite être comparé à celui ayant fait l'objet de la caractérisation et aucun instrument ne devra conduire à des écarts supérieurs à l'incertitude déterminée en a) ;
- c) Une description détaillée des résultats de telles comparaisons et des méthodes appliquées pour la caractérisation devrait être fournie sur demande ;
- d) Afin de s'assurer qu'un modèle de pyrhéliomètre répond bien aux exigences, il est nécessaire qu'il soit raccordé à la RRM par comparaison avec le Groupe étalon mondial (GEM) ou avec une référence dûment reconnue et raccordée au GEM. Les caractéristiques sont jugées satisfaisantes lorsque l'incertitude à 95 pour cent pour une série de mesures raccordées à la RRM est inférieure à 1 W m^{-2} .

7.2.1.2 Pyrhéliomètres étalons secondaires

Un pyrhéliomètre absolu qui n'est pas conforme aux spécifications d'un étalon primaire ou qui n'a pas fait l'objet d'une caractérisation complète peut servir d'étalon secondaire s'il est étalonné par comparaison avec le GEM, avec une incertitude à 95 pour cent inférieure à 1 W m^{-2} pour une série de mesures.

D'autres types d'instruments présentant des valeurs d'incertitude conformes ou à peu près conformes aux exigences établies pour les étalons primaires peuvent être utilisés comme étalons secondaires.

Le pyrhéliomètre à compensation d'Ångström a été et demeure toujours un instrument étalon secondaire pratique pour l'étalonnage des pyranomètres et d'autres pyrhéliomètres. Il a été conçu par K. Ångström comme instrument absolu et a servi de base, en 1905, à l'établissement de l'échelle d'Ångström; il est utilisé actuellement comme étalon secondaire et doit être étalonné par rapport à un instrument de référence.

Le capteur consiste en deux lamelles de Manganin platine d'environ 18 mm de long, 2 mm de large et 0,02 mm d'épaisseur, recouvertes d'une couche de noir de fumée ou d'une peinture noire mate. Une thermopile de cuivre constantan est fixée derrière chaque lamelle de telle manière que la différence de température entre les lamelles puisse être enregistrée par un galvanomètre sensible ou un microvoltmètre électrique. Les dimensions des lamelles et du diaphragme frontal déterminent les demi angles d'ouverture et les angles de pente indiqués au tableau 7.3.

Les mesures s'effectuent en séquences de trois cycles ou plus au cours desquels les lamelles droite et

Tableau 7.3. Caractéristiques angulaires des pyrhéliomètres d'Ångström

Angle	Vertical	Horizontal
Demi-angle d'ouverture	$5^\circ - 8^\circ$	$\sim 2^\circ$
Angle de pente	$0,7^\circ - 1,0^\circ$	$1,2^\circ - 1,6^\circ$

gauche sont alternativement occultées ou irradiées. La lamelle occultée est chauffée par un courant électrique réglable de telle manière que la force thermoélectrique du thermocouple et, par conséquent, la différence de température entre les deux lamelles s'annulent à peu près. Avant et après une séquence de mesure, le zéro est vérifié soit par occultation, soit par irradiation des deux lamelles. Le calcul de l'éclairement énergétique peut différer légèrement selon qu'on adopte l'une ou l'autre de ces deux méthodes. Lors des comparaisons pyrhéliométriques internationales, on adopte la relation suivante :

$$E = K \cdot i_L \cdot i_R \quad (7.2)$$

où E est l'éclairement énergétique en W m^{-2} ; K est la constante d'étalonnage ($\text{W m}^{-2} \text{ A}^{-2}$) déterminée par comparaison avec un étalon primaire; et i_L , i_R est le courant en ampères, mesuré respectivement avec les lamelles gauche et droite irradiées.

Avant et après chaque série de mesures, le zéro du système est ajusté électriquement en appliquant l'une ou l'autre des méthodes décrites ci-dessus, le zéro étant appelé «froid» (occultée) ou «chaud» (irradiée) selon le cas. Normalement, la première lecture, soit i_R , est exclue et seuls les couples suivants, $i_L - i_R$, sont utilisés pour calculer l'éclairement énergétique. Lorsque l'on compare de tels pyrhéliomètres avec d'autres instruments, la valeur dérivée des courants correspond à la moyenne géométrique des éclairements énergétiques aux moments des lectures de i_L et de i_R .

Les accessoires comprennent une source d'alimentation, un régulateur de courant, un galvanomètre à zéro central et un système de contrôle du courant.

La sensibilité du galvanomètre à zéro central devrait être d'environ $0,05 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ par division d'échelle avec une basse impédance d'entrée ($< 10 \Omega$), ou d'environ $0,5 \mu\text{V}$ avec une haute impédance d'entrée ($> 10 \text{ k}\Omega$). Dans ces conditions, une différence de température d'environ $0,05 \text{ K}$ entre les soudures d'un thermocouple cuivre constantan entraîne une déviation d'une division d'échelle, ce qui indique que l'une des deux lamelles subit un accroissement de chaleur d'origine électrique d'environ 0,3 pour cent.

L'incertitude liée à la valeur mesurée de l'éclairement énergétique solaire direct dépend fortement des qualités du système de mesure du courant, lequel est soit un milliampèremètre à cadre mobile, soit un multimètre à affichage numérique qui mesure la tension à une résistance étalon, ainsi que de la compétence de l'opérateur. L'erreur relative dans la valeur finale de l'éclairement énergétique est deux fois plus grande que l'erreur relative intervenant dans la lecture du courant électrique. Le courant de chauffage est envoyé dans les lamelles au moyen d'un commutateur et son intensité est normalement réglée dans chaque circuit par des rhéostats séparés. Le commutateur peut aussi servir à couper le courant pour la détermination du zéro. La résolution des rhéostats devrait être suffisante pour assurer un ajustement du galvanomètre à zéro central dans les limites d'une demi division d'échelle.

7.2.1.3 Pyrhéliomètres de terrain et de réseau

Les pyrhéliomètres ont en général des thermopiles comme détecteurs. Leurs caractéristiques angulaires sont semblables à celles des pyrhéliomètres étalons. Les anciens modèles ont généralement des champs de vision et des angles de pente plus grands. Il s'agissait de faciliter surtout la poursuite du Soleil. Toutefois, plus grands sont l'angle d'ouverture et l'angle de pente, plus grande est la quantité de rayonnement circumsolaire détectée par le capteur, celle-ci pouvant atteindre plusieurs points de pourcentage pour des épaisseurs optiques élevées et de grandes ouvertures angulaires. Avec les montures de poursuite du Soleil de conception récente, notamment celles qui sont informatisées (fonctionnement en mode passif ou actif), il n'est plus nécessaire d'avoir de grands angles de pente. Un angle de pente de 1° est cependant encore requis pour faire en sorte que l'énergie dégagée par le faisceau solaire direct soit distribuée également sur le capteur et pour n'autoriser que des erreurs de poursuite de l'ordre de 0,1°.

Le choix d'un type particulier de pyrhéliomètre sera dicté par l'utilisation que l'on veut en faire. Certains instruments à orientation manuelle, tels que l'actinomètre Linke Fuessner, sont essentiellement utilisés pour des mesures ponctuelles, alors que d'autres, comme les types EKO, Eppley, Kipp et Zonen et Middleton sont spécifiquement destinés à la surveillance continue et à long terme du rayonnement direct. Avant d'installer un instrument, l'utilisateur doit prendre en compte les différences importantes qui existent entre les pyrhéliomètres opérationnels :

- a) L'angle d'ouverture de l'instrument ;
- b) La question de savoir si l'instrument mesure à la fois le rayonnement de grandes longueurs d'onde et le rayonnement de courtes longueurs d'onde (autrement dit, si l'ouverture est recouverte ou non d'une fenêtre en verre ou en quartz) ;

- c) Les méthodes de compensation ou de correction de température ;
- d) L'intensité et la variation du signal d'éclairement énergétique zéro ;
- e) La question de savoir si l'instrument peut être monté sur un système autoguidé de poursuite du Soleil pour une surveillance continue ;
- f) La question de savoir si, pour l'étalonnage d'autres pyrhéliomètres opérationnels, les facteurs a) à c) sont les mêmes, et si le pyrhéliomètre est d'une qualité suffisante pour étalonner d'autres instruments du réseau.

7.2.1.4 Étalonnage des pyrhéliomètres

Il est indispensable d'étalonner tous les pyrhéliomètres autres qu'absolus en prenant le Soleil comme source et en les comparant à un pyrhéliomètre raccordé par chaîne d'étalonnage au GEM et qui présente une incertitude d'étalonnage vraisemblablement égale à celle de l'instrument étalonné ou meilleure.

Toutes les données de radiométrie solaire doivent se référer à la RRM; on applique donc aussi au pyrhéliomètre absolu un facteur d'alignement déterminé par comparaison avec le GEM et non son propre facteur. Après de semblables comparaisons (par exemple les comparaisons internationales de pyrhéliomètres (IPC)), ces pyrhéliomètres peuvent servir d'étalons primaires pour étalonner, à leur tour, avec le Soleil comme source, des étalons secondaires et des pyrhéliomètres de terrain. Des étalons secondaires peuvent également être utilisés pour étalonner des instruments de terrain, mais l'incertitude est accrue.

La qualité de tels étalonnages peut dépendre de l'influence de l'auréole dans le cas où les comparaisons portent sur des instruments à caractéristiques angulaires différentes. La qualité des résultats reposera aussi sur la variabilité de l'éclairement énergétique solaire, si les constantes de temps et les signaux d'éclairement zéro des pyrhéliomètres sont sensiblement différents. Enfin, les conditions ambiantes, notamment la température, la pression et le rayonnement total résultant de grandes longueurs d'onde, peuvent influer sur les résultats. Si l'on exige une très grande exactitude dans l'étalonnage, seules les données de mesures effectuées au cours de journées où le ciel est très clair et l'atmosphère stable sont à prendre en considération.

Les méthodes d'étalonnage des pyrhéliomètres de terrain sont décrites dans une norme ISO (ISO, 1990b).

D'après l'expérience acquise durant les dernières IPC, il serait suffisant de réétalonner tous les cinq ans les étalons primaires et secondaires rattachés au GEM.

Les pyrhéliomètres de terrain devraient être réétalonnés une fois par an ou tous les deux ans, l'intervalle entre ces opérations étant d'autant plus court que les instruments font l'objet d'un usage plus intensif et opèrent dans des conditions plus rigoureuses.

7.2.2 Mesures spectrales de l'éclairement énergétique solaire direct et mesure de l'épaisseur optique

En météorologie, les mesures spectrales de l'éclairement énergétique solaire direct servent essentiellement à déterminer l'épaisseur optique (voir annexe 7.B) dans l'atmosphère. Elles sont aussi destinées à des applications dans les domaines de la médecine, de la biologie, de l'agriculture et de l'énergie solaire.

L'épaisseur optique des aérosols est un paramètre associé à l'extinction totale du rayonnement solaire, c'est-à-dire la diffusion et l'absorption de celui-ci par des aérosols dont les rayons sont compris entre 100 et 10 000 nm, pour une colonne de l'atmosphère équivalente à la masse d'air optique unitaire. Mais les particules ne sont pas les seuls facteurs à prendre en considération. D'autres constituants atmosphériques, tels que les molécules d'air (diffuseurs de Rayleigh), l'ozone, la vapeur d'eau, le dioxyde d'azote et le dioxyde de carbone, contribuent aussi à l'extinction totale du faisceau. La plupart des mesures de l'épaisseur optique servent à mieux comprendre les concentrations d'aérosols dans l'atmosphère. On peut toutefois obtenir des mesures de l'épaisseur optique d'autres constituants, comme la vapeur d'eau, l'ozone et le dioxyde d'azote, si l'on choisit les bandes de longueurs d'onde voulues.

L'épaisseur optique des aérosols, $\delta_a(\lambda)$, pour une longueur d'onde donnée, λ , est fondée sur la loi de Bouguer-Lambert (ou la loi de Beer pour le rayonnement monochromatique) et se calcule comme suit :

$$\delta_a(\lambda) = \frac{\ln(E_0(\lambda) / E(\lambda)) - \sum (\delta_i(\lambda) \cdot m_i)}{m_a} \quad (7.3)$$

où $\delta_a(\lambda)$ est l'épaisseur optique des aérosols pour une bande de longueurs d'onde centrée à la longueur d'onde λ , m_a est la masse d'air pour les aérosols (unité dans le plan vertical), δ_i est l'épaisseur optique pour un constituant, i , autre que les aérosols pour une bande de longueurs d'onde centrée à la longueur d'onde λ , m_i est la masse d'air pour un agent d'extinction, i , autre que les aérosols, $E_0(\lambda)$ est l'éclairement énergétique solaire spectral à l'extérieur de l'atmosphère à une longueur d'onde λ et $E(\lambda)$ est l'éclairement énergétique solaire spectral à la surface à une longueur d'onde λ .

L'épaisseur optique correspond à l'extinction totale le long du trajet du faisceau à travers l'atmosphère, à savoir la masse d'air multipliée par l'épaisseur optique $m\delta$.

Le trouble atmosphérique, τ , est la même grandeur que l'épaisseur optique, mais on utilise pour le calculer la base 10 au lieu de la base e , selon la loi de Beer :

$$\tau(\lambda)m = \log (E_0(\lambda)/E(\lambda)) \quad (7.4)$$

de sorte que :

$$\tau(\lambda) = 2.301\delta(\lambda) \quad (7.5)$$

On procède en météorologie à deux types de mesure : la pyrhéliométrie spectrale à large bande et l'héliophotométrie, qui fait appel à des filtres à bandes passantes étroites. Comme l'épaisseur optique des aérosols ne se réfère qu'à un rayonnement monochromatique ou à un domaine très étroit de longueurs d'onde, cette grandeur peut s'appliquer directement à l'évaluation des données héliophotométriques, mais non à celle des données pyrhéliométriques à larges bandes passantes.

Les observations de l'épaisseur optique des aérosols ne devraient s'effectuer que lorsqu'aucun nuage ne se présente à l'intérieur de 10° du Soleil. Quand les conditions le permettent, le plus grand nombre possible d'observations devraient être réalisées le même jour et la plus grande portion possible de masse d'air devrait être couverte, de préférence par pas de $\Delta m = 0,2$.

Seules les observations instantanées, c'est-à-dire d'une durée de moins d'une seconde, sont utilisables pour la détermination de l'épaisseur optique des aérosols.

7.2.2.1 Pyrhéliométrie spectrale à large bande

La pyrhéliométrie spectrale à large bande exige l'emploi d'un pyrhéliomètre soigneusement étalonné, équipé de filtres frontaux en verre destinés à choisir les bandes spectrales voulues. Les spécifications des filtres usuels sont données au tableau 7.4.

Les longueurs d'onde de coupure dépendent de la température, et il peut être nécessaire d'apporter quelques corrections aux mesures. Les filtres doivent être bien nettoyés avant l'usage. En cours d'utilisation, ils devraient être vérifiés chaque jour et nettoyés si le besoin s'en fait sentir.

Comme le calcul de l'épaisseur optique des aérosols à partir des mesures spectrales à large bande est très complexe, il n'existe pas de méthode standard. On peut utiliser des tables avec certaines hypothèses sur l'état de l'atmosphère. La validité des résultats repose sur le degré de correspondance des caractéris-

Tableau 7.4. Spécifications des filtres en verre de type Schott idéalisés

Type Schott	Longueurs d'onde typiques de coupure à 50% (nm)		Transmission moyenne (3 mm d'épaisseur)	Coefficient de température approximatif de la coupure d'onde courte (nm K ⁻¹)
	Courte	Longue		
OG 530	526 ± 2	2 900	0,92	0,12
RG 630	630 ± 2	2 900	0,92	0,17
RG 700	702 ± 2	2 900	0,92	0,18

Les coefficients de température pour les filtres Schott sont indiqués par le fabricant. Les coupures d'onde courte sont ajustées aux filtres standard utilisés pour l'étalonnage. Il est nécessaire de vérifier les coupures d'ondes courtes et longues pour réduire les incertitudes concernant les valeurs dérivées.

tiques spectrales du filtre utilisé avec celles du filtre de référence et sur la valeur des hypothèses concernant l'état de l'atmosphère. On trouvera des précisions sur ces évaluations et les tables associées dans la publication de l'OMM (1978). Les techniques sont décrites par Kuhn (1972) et Lal (1972).

7.2.2.2 Héliophotométrie et épaisseur optique des aérosols

Les heliophotomètres comprennent un filtre interférentiel à bande étroite et un détecteur photovoltaïque, généralement une photodiode au silicium. Le champ de vision complet de l'instrument est de 2,5° et l'angle de pente de 1° (voir figure 7.1). Bien que la mesure de l'épaisseur optique à l'aide de ces instruments soit simple du point de vue conceptuel, un grand nombre de mesures anciennes n'ont pas donné de résultats utiles. Cela s'explique essentiellement par le décalage de la réponse de l'instrument dû à l'évolution rapide des facteurs de transmission des filtres et des caractéristiques des détecteurs, ainsi que par la formation insuffisante des opérateurs. On peut néanmoins obtenir des résultats exacts en utilisant correctement les instruments et en contrôlant fréquemment la stabilité. Les heliophotomètres devraient être étalonnés fréquemment, de préférence à l'aide de méthodes *in situ* ou d'instruments de référence conservés par un centre radiométrique compétent dans le domaine de la détermination de l'épaisseur optique.

Pour obtenir de plus amples informations sur les heliophotomètres à bande étroite et sur l'exploitation des réseaux, on se reportera à la publication de l'OMM (1993a).

Pour calculer avec un faible degré d'incertitude l'épaisseur optique des aérosols à partir de données heliophotométriques, il faut connaître l'emplacement de la station, la pression, la température, la quantité d'ozone dans la colonne et l'heure exacte de l'observation (OMM, 2005). Les calculs les plus précis des épaisseurs optiques totales et des aérosols à partir de données spectrales pour la longueur d'onde

de λ (correspondant au centre de la bande passante du filtre), font appel à la relation suivante :

$$\delta_a(\lambda) = \frac{\ln\left(\frac{S_0(\lambda)}{S(\lambda)R^2}\right) - \frac{P}{P_0}\delta_R(\lambda)m_R - \delta_{O_3}(\lambda)m_{O_3}...}{m_a} \quad (7.6)$$

où $S(\lambda)$ est la lecture instrumentale (par exemple en volts ou en nombres), $S_0(\lambda)$ est la lecture hypothétique correspondant à l'éclairement énergétique solaire spectral au sommet de l'atmosphère à 1 UA (qui s'obtient par une extrapolation à la masse d'air zéro selon la méthode dite de Langley ou par le centre radiométrique qui étalonne l'instrument), R est la distance Terre Soleil (en unités astronomiques; voir annexe 7.D), P est la pression atmosphérique, P_0 est la pression atmosphérique standard et les deuxième et troisième termes ainsi que les termes suivants de la ligne supérieure sont les contributions des diffuseurs de Rayleigh, de l'ozone et d'autres facteurs d'extinction. Ce calcul peut être simplifié pour des travaux moins précis en supposant que les masses d'air relatives pour chacun des éléments sont égales.

En heliophotométrie, l'extinction de Rayleigh doit être prise en compte pour toutes les longueurs d'onde. L'épaisseur optique de l'ozone doit être considérée aux longueurs d'onde inférieures à 340 nm et dans toute la bande de Chappuis. Dans le cas du dioxyde d'azote, il faut intégrer toutes les longueurs d'onde inférieures à 650 nm, surtout si les mesures sont faites dans des zones subissant l'influence des villes. Bien qu'il y ait de faibles bandes d'absorption de la vapeur d'eau même dans le domaine spectral de 500 nm, on peut ignorer l'absorption du rayonnement par la vapeur d'eau aux longueurs d'onde inférieures à 650 nm. Pour le choix des longueurs d'onde, on se reportera à la publication de l'OMM (1986b).

Pour la diffusion de Rayleigh, les épaisseurs optiques devraient être calculées à l'aide d'un algorith-

me simple selon la méthode décrite par Fröhlich et Shaw (1980), mais en utilisant la correction de Young (1981). Si l'on veut davantage d'exactitude, on peut avoir recours à l'algorithme de Bodhaine et al. (1999). L'ozone et le dioxyde d'azote suivent la loi sur l'absorption de Beer. Le Centre mondial de données sur l'ozone recommande, pour ce constituant, les coefficients d'absorption de Bass et Paur (1985) dans l'ultraviolet et de Vignoux (1953) dans le visible. Les coefficients d'absorption du dioxyde d'azote peuvent être obtenus selon la méthode de Schneider et al. (1987). Pour la réduction des longueurs d'onde influencées par la vapeur d'eau, on peut se référer aux travaux de Frouin, Deschamps et Lecomte (1990). Vu la complexité de l'absorption par la vapeur d'eau, il faudrait éviter les bandes subissant une forte influence à moins de dériver la quantité de vapeur d'eau par héliophotométrie.

7.2.3 Exposition

Pour des enregistrements continus et des incertitudes réduites, il est essentiel d'avoir recours à un dispositif de poursuite précis et suffisamment protégé contre les effets du milieu ambiant. La poursuite doit être ajustée avec une exactitude de 0,2° et les instruments devraient être vérifiés au moins une fois par jour, et plus fréquemment si les conditions météorologiques l'exigent (avec une protection contre les conditions néfastes).

La principale exigence en matière d'exposition pour la surveillance du rayonnement solaire direct est l'absence d'obstruction dans la direction du faisceau incident en tout temps et en toute saison de l'année. En outre, le site devrait être choisi de telle manière que les occurrences de brouillard, fumées et pollution de l'air y soient aussi représentatives que possible des conditions locales.

Pour des observations continues, on utilise couramment une fenêtre destinée à protéger le capteur et les éléments optiques contre la pluie, la neige et d'autres intempéries. Il faut veiller à ce que celle-ci reste propre et que la condensation ne se dépose pas à l'intérieur de l'appareil. Afin d'obtenir de bonnes données sur l'épaisseur optique des aérosols, il est impératif de prendre toutes ces précautions, car une dérive de 1 pour cent de la transmission à la masse d'air unitaire se traduit en un changement de 0,010 dans les valeurs résultantes. Par exemple, pour une transmission à 500 nm sur un site propre localisé au niveau de la mer, un changement de 0,010 correspond à 20-50 pour cent de l'épaisseur optique hivernale moyenne.

7.3

MESURE DU RAYONNEMENT GLOBAL ET DIFFUS

Le rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale à partir d'un angle solide de 2π sr est appelé rayonnement global. Celui-ci comprend à la fois le rayonnement solaire direct transmis dans l'angle solide limité au disque solaire et le rayonnement du ciel ayant été diffusé en traversant l'atmosphère.

L'instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire parvenant sur une surface plane à partir d'un angle solide de 2π sr et dans le domaine spectral de 300 à 3 000 nm est le pyranomètre. On s'en sert aussi quelquefois pour la mesure du rayonnement solaire sur des surfaces inclinées ou en position inversée pour la mesure du rayonnement global réfléchi. Si l'on ne veut mesurer que la composante diffuse du rayonnement solaire, il convient d'éliminer la composante solaire direct au moyen d'un dispositif d'ombrage (voir section 7.3.3).

Les pyranomètres ont habituellement comme récepteurs des éléments thermoélectriques, photoélectriques, pyroélectriques ou bimétalliques. Exposés en permanence par tous les temps, ils doivent être robustes et capables de résister aux effets corrosifs de l'air humide (surtout à proximité de la mer). Le récepteur doit être hermétiquement scellé dans le bâti et celui-ci doit être facilement démontable de manière que l'on puisse éliminer toute condensation éventuelle. Lorsque le récepteur n'est pas scellé en permanence, on place généralement une cartouche de produit desséchant dans la partie inférieure de l'instrument. Les caractéristiques à prendre en compte pour évaluer l'incertitude et la qualité des mesures fournies par un pyranomètre sont les suivantes: la sensibilité de l'instrument, sa stabilité, son temps de réponse, ses réponses en cosinus et en azimut, la linéarité de ses lectures, sa réponse en température, le décalage thermique, le signal d'éclairement énergétique zéro et sa réponse spectrale. On trouvera d'autres informations sur l'utilisation des pyranomètres dans les publications de l'ISO (1990c) et de l'OMM (1998).

Le tableau 7.5 (dérivé d'ISO, 1990a) décrit les caractéristiques de pyranomètres ayant divers niveaux de performance, en indiquant les degrés d'incertitude que l'on peut atteindre avec des installations appropriées, du personnel formé comme il se doit et un contrôle qualité sérieux, dans les conditions de ciel établies dans la section 7.2.1.

7.3.1

Étalonnage des pyranomètres

L'étalonnage d'un pyranomètre consiste à déterminer un ou plusieurs facteurs d'étalonnage et dans

Tableau 7.5. Caractéristiques des pyranomètres opérationnels

<i>Caractéristiques</i>	<i>Qualité supérieure^a</i>	<i>Bonne qualité^b</i>	<i>Qualité moyenne^c</i>
Temps de réponse (95% du signal)	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Décalage du zéro :			
a) Réponse à un rayonnement thermique net de 200 W m ⁻² (avec ventilation)	7 W m ⁻²	15 W m ⁻²	30 W m ⁻²
b) Réponse à un changement de la température ambiante de 5 K h ⁻¹	2 W m ⁻²	4 W m ⁻²	8 W m ⁻²
Résolution (plus petite variation détectable)	1 W m ⁻²	5 W m ⁻²	10 W m ⁻²
Stabilité (changement par an, pourcentage à fond d'échelle)	0,8	1,5	3,0
Réponse en direction pour rayonnement direct (étendue des erreurs de mesure faites en mesurant dans une direction quelconque un rayonnement dont l'éclairement énergétique sous incidence normale est égal à 1 000 W m ⁻² et en supposant que la réponse de l'appareil pour cette direction est égale à sa réponse pour une incidence normale)	10 W m ⁻²	20 W m ⁻²	30 W m ⁻²
Réponse en température (erreur maximale en pourcentage due au changement de la température ambiante dans un intervalle de 50 K)	2	4	8
Non-linéarité (écart en pourcentage de la sensibilité à 500 W m ⁻² dû à une différence d'éclairement énergétique entre 100 W m ⁻² et 1 000 W m ⁻²)	0,5	1	3
Sensibilité spectrale (écart en pourcentage du produit du coefficient d'absorption spectrale par le facteur de transmission spectrale par rapport à la moyenne correspondante entre 300 et 3 000 nm)	2	5	10
Réponse en inclinaison (écart en pourcentage par rapport à la sensibilité à 0° (d'inclinaison) dû à un changement d'inclinaison compris entre 0° et 90° pour un éclairement énergétique de 1 000 W m ⁻²)	0,5	2	5
Incertitude possible (95 pour cent du niveau de confiance :			
Totaux horaires	3 %	8 %	20 %
Totaux journaliers	2 %	5 %	10 %

Notes :

- a) Instrument quasiment à la pointe du progrès; peut servir d'étalon de travail; ne peut être entretenu qu'aux stations dotées de personnel spécialisé et où sont prévus des programmes spéciaux.
- b) Qualité suffisante pour l'exploitation du réseau.
- c) Convient aux réseaux peu coûteux où des performances moyennes à faibles sont acceptables.

quelle mesure ceux-ci dépendent de conditions ambiantes comme :

- a) La distribution angulaire de l'éclairement énergétique ;
- b) Les méthodes d'étalonnage ;
- c) La réponse angulaire ;
- d) L'inclinaison de l'instrument ;
- e) Le niveau d'éclairement énergétique ;
- f) L'éclairement énergétique total résultant à

grandes longueurs d'onde pour la correction du décalage thermique ;

- g) La distribution spectrale de l'éclairement énergétique ;
- h) La température ;
- i) Les variations dans le temps.

Les utilisateurs de pyranomètres doivent être conscients que l'incertitude des observations aug-

mente quand les conditions d'exposition du capteur s'écartent des conditions déterminées lors de l'étalonnage de l'instrument.

Normalement, il est nécessaire de spécifier les conditions ambiantes prévalant lors des caractérisations, car celles-ci peuvent différer grandement selon les applications. La méthode utilisée et les conditions devraient donc être décrites de façon assez détaillée dans le certificat d'étalonnage.

L'étalonnage des pyranomètres s'effectue au moyen de diverses méthodes faisant appel au rayonnement provenant du Soleil ou de sources artificielles en laboratoire, dont les suivantes :

- a) Comparaison avec un pyrhéliomètre étalon pour l'éclairement énergétique solaire direct et un pyranomètre occulté étalonné pour le rayonnement diffus ;
- b) Comparaison avec un pyrhéliomètre étalon en prenant comme source le Soleil et en plaçant un disque d'ombrage amovible sur le pyranomètre ;
- c) Comparaison avec un pyrhéliomètre étalon en prenant comme source le Soleil et en faisant appel à deux pyranomètres étalonnés en alternance pour mesurer l'éclairement énergétique global et diffus ;
- d) Comparaison avec un pyranomètre étalon en prenant comme source le Soleil ou d'autres conditions naturelles d'exposition (par exemple un ciel uniformément couvert et un éclairement énergétique solaire direct non diffus statistiquement du zéro) ;
- e) Comparaison en laboratoire, sur banc optique, avec un pyranomètre semblable préalablement étalonné à l'extérieur, en utilisant une source artificielle, soit à incidence normale, soit à d'autres hauteurs angulaires ou angles d'azimut ;
- f) Comparaison en laboratoire, dans une chambre intégratrice simulant le rayonnement diffus du ciel, avec un pyranomètre préalablement étalonné à l'extérieur.

Ce ne sont pas là les seules méthodes; néanmoins, les méthodes décrites en a), b), c) et d) sont couramment utilisées. À l'exception de b), il est essentiel de connaître les signaux d'éclairement énergétique zéro pour tous les instruments ou d'utiliser des paires de pyranomètres de modèle identique dans des configurations semblables. Ne pas tenir compte de ces décalages et de ces différences pourrait fausser grandement les résultats obtenus.

Il semble que la méthode c) donne de très bons résultats sans avoir à recourir à un pyranomètre étalonné.

Il est malaisé de déterminer le nombre de mesures nécessaires pour le calcul du facteur d'étalonnage d'un pyranomètre. On peut cependant calculer l'écart type de la moyenne, qui devrait être inférieur à la limite souhaitée dès lors que le nombre de lectures est suffisant dans les conditions voulues. Les principales variations (mises à part les fluctuations dues aux conditions atmosphériques et aux contraintes d'observation) du facteur d'étalonnage dérivé sont attribuables aux éléments suivants :

- a) Écarts par rapport à la réponse selon la loi des cosinus, en particulier pour des hauteurs du Soleil inférieures à 10° (c'est pourquoi il est préférable de n'effectuer les étalonnages que pour des hauteurs supérieures à 30°) ;
- b) La température ambiante ;
- c) Une mise à niveau incorrecte de la surface réceptrice ;
- d) La non linéarité de la réponse de l'instrument ;
- e) L'éclairement énergétique total résultant à grandes longueurs d'onde entre le capteur et le ciel.

Le pyranomètre doit être étalonné dans tous les cas dans sa position d'utilisation.

Lorsque l'on prend le Soleil comme source, sa hauteur apparente doit être mesurée ou calculée (à 0,01° près) pour cette période à partir du temps solaire (voir annexe 7.D). Il faut aussi noter la température moyenne de l'instrument ou la température ambiante.

7.3.1.1 Comparaison avec un pyrhéliomètre étalon et un pyranomètre de référence occulté

Selon cette méthode, décrite dans la publication de l'ISO (1993), l'étalonnage du pyranomètre se fait par comparaison de la réponse au rayonnement global avec la somme des mesures distinctes du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Il faut privilégier les périodes de ciel dégagé et de conditions de rayonnement stables (déterminées à partir des relevés). La composante verticale de l'éclairement énergétique solaire direct est toujours mesurée par un pyrhéliomètre, mais la composante diffuse est quantifiée par un second pyranomètre occulté en permanence. La composante directe est éliminée par occultation de la totalité de la coupelle extérieure du pyranomètre à l'aide d'un disque de diamètre adéquat monté à l'extrémité d'une tige et maintenu à une distance appropriée. Le diamètre du disque et sa distance par rapport à la surface du récepteur doivent être tels que l'angle ainsi délimité soit approximativement égal à l'angle d'ouverture du pyrhéliomètre. Au lieu d'utiliser le rayon du capteur, on doit plutôt se servir du rayon de la coupelle extérieure pour calculer l'angle de pente de la combinaison dis-

que/pyranomètre. Ce dispositif empêche d'obtenir une approximation rapprochée du faisceau solaire direct et de l'éclairement circumsolaire, tels que captés par le pyrhéliomètre.

Au cours d'une journée de temps clair, l'éclairement diffus est inférieur à 15 pour cent de l'éclairement global; il n'est donc pas indispensable de connaître avec une grande exactitude le facteur d'étalonnage du pyranomètre de référence. Il faut toutefois s'assurer que les signaux d'éclairement énergétique zéro des deux pyranomètres sont pris en compte, étant donné que pour certains pyranomètres utilisés dans des conditions de ciel dégagé, ce signal peut correspondre jusqu'à 15 pour cent de l'éclairement énergétique diffus.

Le facteur d'étalonnage se calcule alors par la relation :

$$E \cdot \sin h + V_s k_s = V \cdot k \quad (7.7)$$

ou:

$$k = (E \sin h + V_s k_s) / V \quad (7.8)$$

où E est l'éclairement énergétique solaire direct mesuré par le pyrhéliomètre (W m^{-2}), V est l'éclairement énergétique global à la sortie du pyranomètre à étalonner (μV), V_s est l'éclairement énergétique diffus en sortie du pyranomètre de référence occulté (μV), h est la hauteur apparente du Soleil au moment de la lecture, k est le facteur d'étalonnage du pyranomètre à étalonner ($\text{W m}^{-2} \mu\text{V}^{-1}$) et k_s est le facteur d'étalonnage du pyranomètre de référence occulté ($\text{W m}^{-2} \mu\text{V}^{-1}$), toutes les mesures de signaux étant effectuées simultanément.

Les composantes globale, directes et diffuses varieront pendant la comparaison; on doit veiller, en établissant les moyennes et en procédant à l'échantillonnage, à ce que des valeurs représentatives soient utilisées pour le calcul.

7.3.1.2 Comparaison avec un pyrhéliomètre étalon

Cette méthode, décrite dans la publication de l'ISO (1993a), est semblable à la précédente, à ceci près que l'éclairement énergétique diffus est mesuré par le même pyranomètre. La composante directe est interceptée temporairement par occultation de la totalité de la coupelle extérieure de l'instrument, comme cela est décrit à la section 7.3.1.1. La durée d'occultation dépend de la stabilité du flux énergétique et du temps de réponse du pyranomètre, y compris l'intervalle de temps nécessaire pour rétablir l'équilibre de la température et de l'émission à grandes longueurs d'onde du dôme de verre; dix fois la constante de temps 1/e de la thermopile du pyranomètre suffit généralement.

La différence entre les signaux représentatifs du pyranomètre occulté et du pyranomètre non occulté est attribuable à la composante verticale de l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct, E , mesuré par le pyrhéliomètre. Ce qui donne :

$$E \cdot \sin h = (V_{un} - V_s) \cdot k \quad (7.9)$$

ou:

$$k = (S \cdot \sin h) / (V_{un} - V_s) \quad (7.10)$$

où E est l'éclairement énergétique solaire direct représentatif à incidence normale mesuré par le pyrhéliomètre (W m^{-2}), V_{un} est le signal de sortie représentatif du pyranomètre (μV) en mode non occulté (ou éclairement énergétique global), V_s est le signal de sortie représentatif du pyranomètre (μV) en mode occulté (ou éclairement énergétique diffus), h est la hauteur apparente du Soleil et k est le facteur d'étalonnage ($\text{W m}^{-2} \mu\text{V}^{-1}$), dont l'inverse est la sensibilité ($\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$).

Les composantes directe et diffuse varieront toutes deux durant la comparaison; aussi faut-il veiller en procédant à l'échantillonnage et en établissant les moyennes à ce que soient utilisés pour le calcul des valeurs représentatives des signaux de sortie des pyranomètres occultés et non occultés. Afin de réduire l'incertitude associée aux signaux représentatifs, il convient de réaliser une série de cycles de mesures avec et sans occultation et d'utiliser des valeurs interpolées dans le temps pour atténuer les variations de l'éclairement énergétique global et diffus dans le temps. Puisque le même pyranomètre est utilisé en mode différentiel et que l'écart entre les signaux d'éclairement énergétique zéro pour le rayonnement global et le rayonnement diffus est négligeable, il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'éclairement énergétique zéro dans l'équation 7.10.

7.3.1.3 Étalonnage alterné à l'aide d'un pyrhéliomètre

Cette méthode fait appel à la même configuration instrumentale que celle décrite à la section 7.3.1.1, à ceci près que le pyrhéliomètre doit fournir des données d'éclairement énergétique étalonnes (E) et que les deux pyranomètres sont censés être non étalonnés (Forgan, 1996). On étalonne les deux pyranomètres par la résolution de deux équations simultanées analogues à l'équation 7.7. Les données de signaux d'éclairement énergétique sont d'abord collectées avec le pyrhéliomètre et un pyranomètre (le pyranomètre A) mesure les signaux d'éclairement énergétique global (V_{gA}) et l'autre pyranomètre (le pyranomètre B) mesure les signaux d'éclairement énergétique diffus (V_{dB}) sur une plage donnée de distances zénithales du Soleil dans des conditions de ciel dégagé. Lorsqu'une quantité suffisante de données ont été recueillies avec la configuration initiale, les pyrano-

mètres sont intervertis de sorte que le pyranomètre A, qui mesurait à l'origine l'éclairement énergétique global, mesure maintenant la composante diffuse (V_{dA}), et vice-versa. On se fonde sur l'hypothèse que pour chaque pyranomètre, les coefficients d'étalonnage du rayonnement diffus (k_d) et du rayonnement global (k_g) sont égaux; ce qui donne la relation suivante pour le pyranomètre A :

$$k_A = k_{gA} = k_{dA} \quad (7.11)$$

On retient la même hypothèse pour les coefficients du pyranomètre B; par conséquent, pour un temps, t_0 , au cours de la période initiale, la version modifiée de l'équation 7.7 s'écrit comme suit:

$$E(t_0) \sin(h(t_0)) = k_A V_{gA}(t_0) - k_B V_{dB}(t_0) \quad (7.12)$$

Pour un temps, t_1 , pendant l'autre période avec interversion des pyranomètres, on obtient la formule suivante:

$$E(t_1) \sin(h(t_1)) = k_B V_{gB}(t_1) - k_A V_{dA}(t_1) \quad (7.13)$$

Comme les seules inconnues des équations 7.12 et 7.13 sont k_A et k_B , celles-ci peuvent être résolues pour n'importe quelle paire de temps (t_0, t_1). Les paires qui couvrent une plage de hauteurs du Soleil donnent une indication de la réponse en direction. L'information obtenue pour l'étalonnage des deux pyranomètres est représentative des coefficients d'étalonnage du rayonnement global et produisent des données identiques à celles découlant de la méthode 7.3.1.1, mais sans qu'il soit nécessaire de faire appel à un pyranomètre étalonné.

Comme avec la méthode 7.3.1.1, pour obtenir des coefficients produisant le minimum d'incertitude, il faut ajuster les signaux d'éclairement énergétique des pyranomètres, afin d'éliminer tout décalage d'éclairement énergétique zéro estimé. Si l'on veut réduire l'incertitude associée à la variation de la réponse en direction, il est recommandé d'utiliser une paire de pyranomètres du même modèle et de procéder à des paires d'observation avec $h(t_0) \sim \sin h(t_1)$.

Cette méthode convient parfaitement aux conditions de surveillance automatique et permanente sur le terrain des trois composantes d'éclairement énergétique (directe, diffuse et globale). D'après l'expérience acquise, il est préférable de recueillir les données nécessaires à l'intérieur d'une journée, les instruments étant intervertis aux environs du midi solaire. Sur le terrain toutefois, les périodes et jours avant et après les changements d'instrument peuvent servir à la sélection des données, à condition que le pyrhéliomètre ait été étalonné correctement.

7.3.1.4 Comparaison avec un pyranomètre de référence

Comme cela est expliqué dans la publication de l'ISO (1992b), cette méthode consiste à comparer simultanément deux pyranomètres montés horizontalement, côté à côté, à l'extérieur pendant une période suffisante pour accumuler des résultats significatifs. Un ou deux jours suffisent si les instruments sont du même modèle et présentent la même configuration de surveillance. Dans le cas contraire, la période de comparaison doit être d'autant plus longue que leur modèle et leur configuration sont différents. Il est toutefois possible de remplacer une longue période par plusieurs périodes plus courtes, représentatives de conditions typiques (ciel dégagé, ciel nuageux, pluie, neige, etc.). On déduit directement la constante instrumentale, mais lorsque les modèles sont différents, l'incertitude obtenue est davantage susceptible de refléter cette différence, plutôt qu'une variation de la stabilité de l'instrument à étalonner. On doit choisir les données de préférence lorsque les valeurs d'éclairement énergétique sont élevées et varient lentement. Chacune des valeurs moyennes des rapports, R , entre la réponse de l'instrument à étalonner et celle de l'instrument de référence peut être utilisée pour calculer la constante instrumentale de l'appareil à étalonner, $k = R \cdot k_r$, où k_r est la constante de l'instrument de référence et k le facteur d'étalonnage déduit. Pendant l'étalonnage, à condition que l'intervalle entre les mesures soit inférieur à la constante de temps, 1/e, des pyranomètres, la collecte des données peut être effectuée lorsque l'éclairement énergétique fluctue.

La température moyenne des instruments ou celle de l'air ambiant devrait être enregistrée au cours de toute opération d'étalonnage effectuée à l'extérieur, de façon qu'on puisse tenir compte des effets éventuels de la température sur le facteur instrumental.

7.3.1.5 Comparaison en laboratoire

Deux méthodes impliquent le recours à des sources artificielles de lumière soit directe, soit diffuse. Dans les deux cas, l'instrument à étalonner et l'instrument de référence doivent être irradiés dans les mêmes conditions.

Dans la première méthode, l'instrument est exposé au rayonnement d'une lampe à filament de tungstène stabilisée fixée à l'extrémité d'un banc optique. Une lampe halogène de 0,5 à 1 kW, refroidie par circulation d'eau et ventilation forcée, dont l'émission est réduite au domaine spectral du rayonnement solaire à l'aide d'un filtre à quartz, convient parfaitement, à condition que le pyranomètre à étalonner et le pyranomètre de référence aient la même réponse spectrale. On devrait utiliser, pour les étalonnages

généraux, une lampe à xénon sous haute pression, équipée de filtres reproduisant aussi fidèlement que possible le spectre solaire. Il faut alors protéger les instruments des effets parasites dus à la réflexion au moyen d'écrans noirs. Le processus usuel consiste à installer d'abord l'instrument de référence et à effectuer une mesure du flux énergétique, puis à lui substituer le pyranomètre à étalonner et à refaire les mesures. On continue à se servir alternativement des deux instruments autant de fois qu'il le faut pour obtenir un jeu de mesures dont l'exactitude soit satisfaisante, c'est-à-dire environ 0,5 pour cent.

Dans la seconde méthode, l'étalonnage s'accomplit à l'intérieur d'une sphère ou d'une demi sphère intégratrice éclairée par des lampes à tungstène. La paroi interne est recouverte d'une couche de peinture blanche à fort pouvoir réfléchissant et diffusant. Cette méthode offre l'avantage de permettre l'exposition simultanée du pyranomètre de référence et de l'instrument à étalonner. La sphère ou la demi sphère simulant un ciel à luminance énergétique quasi uniforme, les erreurs angulaires de l'instrument sont les plus importantes à 45° d'incidence. Comme l'erreur en cosinus est normalement faible à une telle incidence, la répétabilité des mesures n'excède généralement pas 0,5 pour cent. Les indications données dans l'exposé de la première méthode à propos des sources de lumière artificielles valent également pour l'illumination de la sphère intégratrice.

7.3.1.6 Contrôle courant des facteurs d'étalonnage

Il existe plusieurs méthodes pour contrôler la constance de l'étalonnage des pyranomètres, selon l'équipement disponible à une station donnée. Il ne faut jamais hésiter à vérifier le fonctionnement de ces instruments sur le terrain chaque fois que l'occasion se présente.

Dans les stations qui possèdent des étalons (pyrhéliomètres ou pyranomètres) soigneusement entretenus, les procédures de base décrites ci-dessus sont applicables. Quand la station ne dispose pas d'étalon, il est possible de recourir à d'autres solutions. Si l'on procède à un enregistrement simultané du rayonnement solaire direct, on peut examiner la cohérence des deux relevés au moyen de la méthode de normalisation directe décrite à la section 7.3.1.2; cette vérification simple doit être répétée fréquemment.

Si l'on procède à un enregistrement simultané du rayonnement global et du rayonnement diffus, il faudrait comparer souvent les deux enregistrements. Par temps totalement couvert, le rayonnement global et le rayonnement diffus devraient être identiques, et on peut avoir recours à un disque d'occul-

tation dans ces conditions météorologiques pour surveiller le rayonnement diffus. Lorsque l'on emploie des bandes d'occultation, il est recommandé de les retirer pour pouvoir mesurer le rayonnement global à l'aide de cet instrument et comparer les résultats obtenus avec les mesures simultanées effectuées avec le pyranomètre servant à quantifier le rayonnement global.

On peut aussi vérifier les lectures à l'aide d'un étalon itinérant prêté par la station centrale ou par une station voisine. Enfin, si l'étalonnage n'est pas réalisé sur le site, on peut échanger le pyranomètre par un modèle semblable provenant de la station d'étalonnage. Il faut avoir recours à l'une ou à l'autre des deux méthodes précédentes au moins une fois par année. Les pyranomètres utilisés pour la mesure du rayonnement solaire réfléchi devraient être remis à l'endroit et contrôlés de la même façon que précédemment.

7.3.2 Performance des pyranomètres

Il faut se montrer très minutieux et ne négliger aucun détail si l'on veut répondre aux exigences en matière d'incertitude. Bon nombre de propriétés se rapportant tant aux caractéristiques de l'instrument qu'à la nature des mesures sont à prendre en considération pour évaluer l'incertitude des données obtenues. Il a, par exemple, été démontré que pour un enregistrement continu du rayonnement global sans mesures auxiliaires des composantes diffuse et directe, une incertitude meilleure que 5 pour cent dans les totaux quotidiens représentait le résultat d'un travail suivi et méticuleux. De même, lorsque l'on a recours à un protocole semblable à celui proposé par l'OMM (1998), l'incertitude des totaux quotidiens peut être de l'ordre de 2 pour cent.

7.3.2.1 Mise à niveau du capteur

Il est essentiel, si l'on veut obtenir des mesures exactes du rayonnement global à l'aide d'un pyranomètre, que la surface plane de la thermopile soit parfaitement horizontale quand le niveau à bulle en donne l'indication. Ceci peut être vérifié en laboratoire avec un plateau de mise à niveau optique et d'une lampe à collimateur orientée de manière que les rayons incidents atteignent l'instrument sous un angle de 20° environ. On ajuste les vis de calage de l'instrument jusqu'au moment où sa réponse est la plus constante possible lors du mouvement de rotation du capteur autour de l'axe vertical. Le niveau à bulle est alors réglé à nouveau, si nécessaire, pour indiquer le plan horizontal. Cette opération s'appelle la mise à niveau radiométrique, qui devrait en principe correspondre à la mise à niveau mécanique de la thermopile, sauf si la qualité de la surface de la pile n'est pas uniforme.

7.3.2.2 Variations de la sensibilité dues aux variations de la température ambiante

La sensibilité des instruments à thermopile varie en fonction des fluctuations de températures instrumentales. Certains appareils sont dotés de circuits intégrés de compensation destinés à assurer une réponse constante dans une large gamme de températures. Le coefficient de température associé à la sensibilité peut être mesuré dans une enceinte à température réglable. À l'intérieur de celle-ci, la température est réglée par pas de 10° et maintenue constante à chaque niveau jusqu'à stabilisation de la réponse du pyromètre. Les données sont ensuite intégrées dans une courbe lisse. Si le pourcentage maximal d'erreur de la réponse sur la gamme opérationnelle de températures ambiantes est de 2 pour cent ou plus, il convient d'apporter une correction fondée sur l'ajustement des données.

Si l'on ne dispose pas d'enceinte à température réglable, la méthode d'étalonnage avec pyrhéliomètres (voir les sections 7.3.1.1, 7.3.1.2 ou 7.3.1.3) peut être utilisée à différentes températures ambiantes. Il ne faut pas oublier que la sensibilité peut varier non seulement en fonction de la température, mais également, par exemple, de la réponse en cosinus (c'est-à-dire l'effet de la hauteur du Soleil) et de la non linéarité (c'est-à-dire les variations de l'éclairement énergétique du rayonnement solaire).

7.3.2.3 Variations de la réponse en fonction de l'orientation

Le facteur d'étalonnage d'un pyromètre peut incontestablement varier lorsque l'instrument est utilisé dans une autre orientation que celle dans laquelle il a été étalonné. Il est possible de le vérifier par des effets d'inclinaison exécutés en laboratoire ou par une des méthodes décrites dans les sections 7.3.1.1 ou 7.3.1.2. Il est donc recommandé d'étalonner le pyromètre dans la même orientation dans laquelle il sera utilisé, et il faut éviter de procéder à une correction en fonction de l'inclinaison, sauf si la réponse de l'instrument a été caractérisée pour diverses conditions.

7.3.2.4 Variations de la réponse en fonction de l'angle d'incidence

La partie de la réponse directionnelle du capteur qui dépend de la hauteur du Soleil est généralement appelée réponse en cosinus selon la loi de Lambert, et celle qui dépend de son azimut est généralement appelée réponse en azimut. Dans le cas idéal, la réponse du récepteur (pour ce qui est de l'éclairement énergétique solaire) devrait être proportionnelle au cosinus de l'angle zénithal et constante pour tous les angles azimutaux du faisceau solaire. Pour les pyromètres, il est recommandé de donner l'erreur

en cosinus (ou le pourcentage d'écart par rapport à la réponse idéale) pour au moins deux valeurs de hauteur angulaire, 30° et 10° de préférence. Une meilleure façon de prescrire la réponse en direction est fournie au tableau 7.5, qui spécifie l'erreur autorisée pour tous les angles.

La détermination de la façon dont la réponse varie en fonction de l'angle d'incidence ne peut se faire qu'en utilisant des lampes comme sources, car la distribution spectrale du Soleil change en fonction de la hauteur angulaire. Si l'on utilise le Soleil comme source, on peut observer une variation apparente de la réponse en fonction de la hauteur angulaire, laquelle est imputable à l'irrégularité de la réponse spectrale.

7.3.2.5 Incertitudes dans les valeurs totales horaires et quotidiennes

Comme la plupart des pyromètres de réseau sont utilisés pour mesurer les expositions horaires ou quotidiennes (ou expositions exprimées en éclairement énergétique moyen), il est évident que l'incertitude de ces valeurs est importante.

Le tableau 7.5 indique les écarts maximaux attendus par rapport aux valeurs vraies, en l'absence d'erreurs d'étalonnage. Les types de pyromètres dans la troisième colonne de ce tableau (c'est-à-dire de qualité moyenne) ne devraient pas être utilisés pour quantifier les totaux horaires ou quotidiens, mais ils peuvent servir à mesurer les irradiations mensuelles et annuelles.

7.3.3 Installation et entretien des pyromètres

L'emplacement choisi pour installer un pyromètre devrait être entièrement dégagé, libre de toute obstruction au-dessus du plan horizontal de l'élément sensible et, en même temps, d'un accès aisé. S'il est impossible de satisfaire ces exigences, il faut au moins qu'il n'y ait sur le site ou dans son voisinage aucun obstacle susceptible d'y projeter une ombre à une époque quelconque de l'année. Le pyromètre ne devrait être placé ni à proximité d'un mur ou d'autres objets clairs pouvant réfléchir les rayons du Soleil, ni dans le champ d'une source artificielle de rayonnement.

Dans la plupart des stations, un toit plat constitue un bon emplacement pour l'installation du pyromètre; à défaut, il convient de poser l'instrument sur un socle érigé assez loin des bâtiments et d'autres obstacles. Dans la mesure du possible, il faudrait choisir le site pour qu'il ne comporte aucun obstacle dont la hauteur soit supérieure à 5°, en particulier dans la gamme des azimuts comprise entre le lever

et le coucher du Soleil , et que les autres obstacles ne réduisent pas de plus de 0,5 sr l'angle solaire total. Si tel n'est pas le cas, des indications très complètes sur l'horizon et les angles solides sous tendus devraient figurer dans la description de la station.

Un examen du site devrait être effectué avant l'installation initiale du pyranomètre, lorsque l'on change son emplacement ou qu'une modification se produit dans les obstacles avoisinants. Une excellente méthode consiste à utiliser un appareil photographique pouvant fournir un quadrillage en hauteur et en azimut sur négatif. Il convient de prendre une série de clichés pour représenter la hauteur angulaire au-dessus du plan de la surface réceptrice du pyranomètre et la répartition angulaire en azimut de tous les obstacles dans toute la périphérie du pyranomètre. Si un tel appareil n'est pas disponible, on peut avoir recours à un théodolite ou à une combinaison compas/clinomètre pour cartographier la distribution angulaire des obstacles.

La description de la station devrait comprendre, outre la latitude et la longitude, l'altitude du pyranomètre au-dessus du niveau de la mer (c'est-à-dire l'altitude de la station augmentée de la hauteur du pyranomètre au-dessus du niveau du sol). Il est aussi très utile de dresser un plan à l'échelle du site indiquant l'emplacement de l'enregistreur, du pyranomètre et de tous les câbles de raccordement.

Le facteur sans doute le plus déterminant dans le choix d'un site est l'accessibilité de l'instrument en vue de fréquentes inspections. Il est hautement recommandé que les pyranomètres et les enregistreurs soient inspectés au moins une fois par jour et, de préférence, plus souvent.

Ces remarques s'appliquent également aux pyranomètres installés sur des navires, des mâts et des bouées. L'installation de pyranomètres sur de telles plates-formes est très difficile et constitue parfois une entreprise dangereuse. Dans ces conditions, il est rare que le fonctionnement de l'instrument ne soit pas perturbé par au moins un obstacle très gênant (par exemple un mât). Les pyranomètres sont soumis à des mouvements et des vibrations ondulatoires provoqués par le ballottement de la plateforme. Il faut donc prendre des précautions spéciales en vue de maintenir le capteur à l'horizontale et d'amortir les vibrations, ce qui exige le plus souvent l'emploi de suspensions à cardan adéquates.

7.3.3.1 Correction pour la réduction des obstacles à un horizon dégagé

Lorsque le faisceau du rayonnement solaire direct est intercepté par un obstacle (ce qui se remarque très facilement par temps dégagé), il convient d'ap-

porter les corrections nécessaires en vue de réduire l'incertitude.

L'apport de corrections aux mesures du rayonnement diffus n'est envisageable que si l'on effectue des enregistrements distincts du rayonnement global et du rayonnement diffus. La procédure consiste à corriger d'abord l'enregistrement du rayonnement diffus puis à ajuster l'enregistrement du rayonnement global. Ce n'est pas la fraction de ciel occultée qui devrait être calculée, mais la fraction de l'éclairement énergétique provenant de cette partie du ciel. Il est clair, aussi, que le rayonnement incident parvenant sous des angles inférieurs à 5° contribue pour une très faible part au rayonnement total. Le rayonnement diffus lui-même, limité à des angles inférieurs à 5°, n'intervenant que pour moins de 1 pour cent du rayonnement diffus total, peut normalement ne pas être pris en compte. Il faut plutôt se concentrer sur les objets sous tendant des angles de 10° ou plus, ainsi que sur ceux qui interceptent le faisceau solaire à un moment quelconque. En outre, il ne faut pas perdre de vue que des objets brillants peuvent réfléchir la lumière du Soleil vers le récepteur.

Il faudrait, théoriquement, prendre en compte la variation de la luminance énergétique du rayonnement diffus dans la totalité de l'hémisphère, afin de déterminer les pertes liées aux différents obstacles. Mais, en pratique, il faut supposer que la luminance est isotrope, c'est-à-dire identique pour toutes les zones du ciel. Cette hypothèse permet de déterminer la réduction de l'éclairement énergétique du rayonnement diffus pour les obstacles de dimensions finies par l'expression suivante:

$$\Delta E_{sky} = \pi^{-1} \int \Phi \int \Theta \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (7.14)$$

où θ est la hauteur angulaire, ϕ est l'angle d'azimut, Θ est la hauteur totale de l'obstacle et Φ est l'angle d'azimut total de l'obstacle.

Cette relation ne s'applique qu'aux cas d'obstacles présentant une surface noire dans la direction du pyranomètre. Pour d'autres objets, la correction doit être multipliée par un facteur de réduction dépendant de leur albédo. La lumière éblouissante que la neige renvoie quand le Soleil est bas sur l'horizon peut même conduire à des corrections de signe opposé.

7.3.3.2 Installation de pyranomètres pour la mesure du rayonnement global

Les pyranomètres doivent être solidement fixés sur leur support de montage par les trous prévus sur le trépied ou l'embase. Il faut toujours éviter soigneusement de soumettre l'instrument à des vibrations ou à des chocs mécaniques pendant son installation.

La meilleure façon de procéder est d'orienter le pyranomètre de manière à ce que ses fils ou ses prises de raccordement soient orientés vers le pôle par rapport à la surface réceptrice, afin de réduire au minimum l'échauffement des conducteurs par le Soleil. Les instruments équipés de thermopiles du type Moll-Gorcynski seront, eux, orientés de sorte que la ligne des soudures thermoélectriques (le côté long du rectangle de la pile) soit dans l'axe est ouest. Dans le cas où (selon le modèle de l'instrument) cette dernière recommandation entre en conflit avec la précédente, il faut quand même lui accorder la priorité puisque, en tout état de cause, les connecteurs pourraient être protégés si nécessaire. S'il y a une tour à proximité, il conviendrait de placer l'appareil le plus loin possible de celle-ci du côté de l'équateur.

Le rayonnement réfléchi par le sol ou par le socle ne doit pas échauffer par irradiation le corps de l'instrument. On peut utiliser un cylindre d'occultation pour éviter cette situation, mais il faut veiller dans ce cas à ce que la ventilation naturelle reste suffisante pour maintenir l'instrument à la température ambiante.

On assujettit ensuite provisoirement le pyranomètre au moyen de vis ou de boulons et on procède à la mise à niveau (à l'aide de vis de calage et du niveau à bulle); après quoi, on finit de serrer les vis en prenant soin de conserver le réglage de mise à niveau, de manière à conserver l'horizontalité de la surface réceptrice quand l'appareil est utilisé, selon les indications du niveau à bulle.

Le support ou la plate-forme doit être suffisamment rigide pour protéger l'instrument contre les chocs et préserver l'horizontalité de la surface réceptrice, en particulier pendant les périodes de forts vents et de rayonnement solaire intense.

Le câble à deux conducteurs reliant le pyranomètre à l'enregistreur doit être étanche à l'eau. Il doit être solidement fixé au support de montage de l'instrument afin d'éviter tout faux contact ou toute rupture par grand vent. Il sera, autant que possible, enterré et dûment protégé si l'enregistreur est éloigné de l'instrument. L'utilisation de câbles blindés est recommandée; le pyranomètre, le câble et l'enregistreur sont reliés à la terre par un conducteur à très basse résistance. Comme pour les autres équipements du type thermoélectrique, il faut veiller à réaliser une soudure permanente cuivre à toutes les connexions au moment du soudage. Toutes les jonctions exposées doivent être protégées contre l'humidité et les risques de détérioration. Après l'identification de la polarité, l'autre extrémité du câble est raccordée au système de collecte de données selon les indications pertinentes.

7.3.3.3 Installation de pyranomètres pour la mesure du rayonnement diffus

Pour mesurer ou enregistrer séparément la composante diffuse du rayonnement solaire, il faut éliminer le rayonnement direct à l'aide d'un dispositif d'ombrage. Lorsque l'on veut obtenir des enregistrements continus, le pyranomètre est occulté soit à l'aide d'un petit disque métallique maintenu par une monture équatoriale dans le faisceau solaire, soit à l'aide d'un arceau d'ombrage monté sur un axe polaire.

La première méthode implique la rotation synchrone d'une tige fine avec le mouvement apparent du Soleil. Si l'on a recours à un moteur synchronisé ou aux éphémérides, il est indispensable de contrôler fréquemment le bon fonctionnement et les réglages du dispositif, car il est difficile de déceler les valeurs faussées. L'emploi de systèmes automatique de poursuite du Soleil peut réduire au minimum ces risques. La seconde méthode nécessite moins de surveillance sur le site mais plus de corrections sur les relevés, vu la quantité appréciable de rayonnement diffus interceptée par le dispositif d'ombrage. Il faut se fonder sur des hypothèses concernant la distribution spectrale et la dimension de la bande d'ombrage, afin d'y apporter des corrections et l'incertitude accrue des résultats obtenus par rapport à ceux provenant de l'utilisation de dispositifs de poursuite automatique du Soleil. On trouvera à l'annexe 7.E de plus amples indications sur la configuration de l'arceau d'ombrage et sur les corrections à apporter.

Le signal d'éclairement énergétique zéro constitue une source d'erreur significative pour les données de rayonnement diffus. Par temps clair, ce signal correspond à $5\text{--}10 \text{ W m}^{-2}$, selon le modèle de pyranomètre, et peut approcher les 15 pour cent de l'éclairement énergétique du rayonnement diffus total. La publication intitulée Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual (OMM, 1998) renferme des méthodes permettant d'atténuer l'effet de ce signal.

L'installation du pyranomètre pour la mesure du rayonnement diffus est semblable à celle du pyranomètre pour la mesure du rayonnement global, à ceci près que la présence de la monture équatoriale ou du support de bande d'ombrage complique un peu les choses. L'instrument doit être placé suffisamment loin d'un autre pyranomètre pour que l'ombre portée de son arceau ou de son disque ne tombe jamais sur celui-ci. Cette remarque prend toute son importance aux hautes latitudes où la hauteur angulaire du Soleil peut être très réduite.

Comme le rayonnement diffus par temps clair peut être inférieur au dixième du rayonnement global, il convient d'accorder une attention toute particulière à la sensibilité du système d'enregistrement.

7.3.3.4 Installation de pyranomètres pour la mesure du rayonnement réfléchi

La hauteur d'installation devrait être de un à deux mètres au-dessus du sol. En été, la surface du sol devrait être couverte de pelouse régulièrement tondue. Dans les régions où il neige, il convient de prévoir un mécanisme qui permette de maintenir l'instrument à une distance raisonnable de la couche de neige. Même si la monture se situe dans le champ de vision de l'instrument, celle-ci devrait être conçue de manière à causer moins de 2 pour cent d'erreur dans les mesures. On devrait pouvoir accéder au pyranomètre pour en vérifier la mise à niveau sans modifier l'état de la surface en dessous, notamment si celle-ci est recouverte de neige.

7.3.3.5 Précautions générales

Les pyranomètres qui fonctionnent en permanence doivent être inspectés au moins une fois par jour et, de préférence plus souvent encore, par exemple lorsqu'on procède aux observations météorologiques courantes. À chaque inspection, il convient de nettoyer et d'essuyer soigneusement les coupelles en verre (en prenant soin de ne pas perturber les mesures diurnes courantes). Les dépôts de neige gelée, de verglas, de gelée blanche ou de givre doivent être éliminés avec précaution (au moins temporairement) par la projection d'un jet de fluide antigivre, les coupelles étant ensuite essuyées. Lors du contrôle quotidien, on doit aussi vérifier que l'instrument est de niveau, qu'il n'y a pas de condensation à l'intérieur de la coupelle et que les surfaces sensibles demeurent noires.

Dans certains réseaux, la coupelle extérieure du pyranomètre est continuellement ventilée par un système de soufflerie, qui supprime ou réduit les dépôts par temps froid et atténue les différences de température entre la coupelle et le boîtier. L'écart de température entre l'apport d'air et l'air ambiant ne devrait pas excéder 1 K. Lorsque des polluants ou du sable se déposent sur le dôme, il faut nettoyer celui-ci très délicatement, de préférence après avoir éliminé la plus grande partie des dépôts en soufflant dessus ou en les humectant légèrement, de manière à ne pas rayer la surface. L'abrasion peut en effet altérer sensiblement les propriétés initiales de transmission du matériau. Les cartouches de produit déshydratant seront régulièrement régénérées (on utilise généralement du silicagel contenant un indicateur coloré).

7.3.3.6 Installation et entretien des pyranomètres montés sur des plates-formes spéciales

Des précautions particulières sont à prendre lorsque l'on installe des équipements sur des plates formes comme les ponts de navire, les bouées, les mâts ou les aéronefs. Les radiomètres installés à bord de navires devraient être montés sur des suspensions à cardans en raison du fort ballottement auquel ils sont soumis.

Si un mât est destiné exclusivement aux observations radiométriques, il doit être muni en son sommet d'une plate forme rigide sur laquelle les capteurs sont disposés de manière à ce que les obstacles qui dissimulent une partie de l'horizon soient du côté le plus éloigné de l'équateur et à ce que les bras supportant les albédomètres soient dirigés vers celui-ci.

Les capteurs sont placés le plus haut possible sur les navires, les bouées et les mâts afin de réduire au minimum les effets des embruns.

Des mesures du rayonnement sont effectuées sans problème depuis plusieurs années à partir d'aéronefs, mais il faut choisir avec soin le type de pyranomètre et son emplacement.

L'installation des équipements, notamment ceux dont l'accès est malaisé, exige la plus grande attention, car la fiabilité des observations en dépend. Il est parfois souhaitable de s'assurer une marge de sécurité en dédoublant les systèmes de mesure exploités dans des conditions particulièrement difficiles.

7.4 MESURE DU RAYONNEMENT TOTAL ET DU RAYONNEMENT DE GRANDES LONGUEURS D'ONDE

La mesure du rayonnement total porte à la fois sur le rayonnement de courtes longueurs d'onde d'origine solaire (300 à 3 000 nm) et le rayonnement de grandes longueurs d'onde d'origine terrestre et atmosphérique (3 000 à 100 000 nm). Les instruments utilisés à cette fin sont les pyrradiomètres. On peut s'en servir pour mesurer les composantes ascendante et descendante du flux énergétique et les employer en paires pour mesurer les écarts entre les deux résultats obtenus, ce qui donne le rayonnement total résultant. Les pyrradiomètres à un capteur, possédant une surface active des deux côtés, sont également utilisés pour l'observation du rayonnement total résultant. Les capteurs de pyrradiomètre se caractérisent par une sensibilité uniforme dans tout le domaine de longueurs d'onde compris entre 300 et 100 000 nm.

La mesure du rayonnement de grandes longueurs d'onde peut se faire directement à l'aide de pyrgéomètres, ou indirectement en soustrayant le rayonnement solaire global du rayonnement total mesuré. La plupart des pyrgéomètres éliminent les courtes longueurs d'onde au moyen de filtres à transmission presque constante pour les grandes longueurs d'onde et quasi opaques pour les courtes longueurs d'onde (300 à 3 000 nm). Il existe aussi des pyrgéomètres (munis ou non de filtres) dont on ne se sert que la nuit et qui, de ce fait, ne comportent aucun dispositif d'élimination des longueurs d'onde sous 3 000 nm.

Le flux, L^- , à grande longueur d'onde mesuré par un pyrgéomètre ou un pyrradiomètre comporte deux composantes, le flux de corps noir émis selon la température de surface de l'élément sensible et le flux énergétique mesuré par le récepteur :

$$L^- = L^* + \sigma T_s^4 \quad (7.15)$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_s est la température de la surface sous jacente (K), L^- est l'éclairement énergétique mesuré soit par un pyrgéomètre de référence, soit au moyen de calculs effectués à partir de la température de la cavité de corps noir au sommet du récepteur supérieur (W m^{-2}) et L^* est le flux énergétique du récepteur (W m^{-2}). Pour mesurer la composante de courte longueur d'onde à l'aide d'un pyrradiomètre, il faut suivre les indications données dans la section 7.3.

7.4.1 Instruments pour la mesure du rayonnement à grandes longueurs d'onde

Ces dix dernières années, de grands progrès ont été accomplis dans la mesure du rayonnement terrestre à l'aide de pyrgéomètres, notamment avec l'apparition du pyrgéomètre à coupelles en silicium, qui fait que cet instrument fournit les mesures les plus exactes du rayonnement terrestre. Il n'en reste pas moins que la mesure du rayonnement terrestre est encore et toujours plus difficile et moins bien comprise que la mesure du rayonnement solaire. On se reportera au tableau 7.6 pour une analyse des sources d'erreur.

Les pyrgéomètres sont exposés aux mêmes erreurs que les pyrradiomètres (voir tableau 7.6).

Il existe deux types de pyrgéomètre: 1) le pyrgéomètre doté d'une thermopile (surface réceptrice) protégée par une coupelle hémisphérique dans laquelle se trouve un filtre interférentiel et 2) le pyrgéomètre dont la thermopile est recouverte d'une surface pla-

ne sur laquelle est posé le filtre interférentiel. Dans les deux cas, la surface sur laquelle se trouve le filtre est en silicium. Le premier modèle présente un champ de vision hémisphérique complet tandis que le second offre un champ de vision de 150°, la modélisation des flux hémisphériques se faisant suivant les instructions du fabricant. L'argument en faveur de cette dernière méthode est que les inexactitudes sont plus grandes lorsque les filtres sont placés à l'intérieur d'une coupelle que lorsque l'on modélise les flux avec une hauteur de moins de 30°. Les deux types d'instrument fonctionnent selon le principe que le signal de sortie mesuré représente la différence entre l'éclairement énergétique émis à partir de la source et la température de rayonnement du corps noir de l'instrument. En général, on peut estimer le rayonnement terrestre obtenu à l'aide d'un pyrgéomètre en ajoutant ce qui suit à la relation 7.15 :

$$L^- = L^* + \sigma T_s^4 + k\sigma (T_d^4 - T_s^4) \quad (7.16)$$

où k est la sensibilité de la coupelle au rayonnement infrarouge ($\mu\text{V}/(\text{W m}^{-2})$) et T_d est la température du capteur (K).

On a procédé récemment à plusieurs comparaisons en utilisant des instruments de fabrication semblable pour diverses configurations de mesure. Il en est ressorti que si l'étalonnage est rigoureux, les flux mesurés dans la nuit concordent à 2 pour cent près, mais que lorsque le rayonnement solaire est intense, la différence d'un instrument à l'autre peut être importante. Cet écart provient du fait que la coupelle en silicium et le filtre interférentiel ne sont pas des réflecteurs parfaits, et que la coupelle chauffe sous l'effet du rayonnement solaire. On peut atténuer ce problème en protégeant l'instrument par un dispositif d'ombrage comme dans le cas des mesures du rayonnement diffus, en prévoyant une ventilation conformément aux recommandations de l'ISO (1990a) et en mesurant la température de la coupelle et du bâti. Sur la base des résultats de ces comparaisons parmi d'autres, les recommandations ci-après devraient être suivies pour la mesure du rayonnement de grandes longueurs d'onde :

- a) Lorsqu'on utilise des pyrgéomètres à circuit de batterie intégré pour créer les conditions de corps noir de l'instrument, il faut absolument s'assurer que la batterie est bien entretenue. Il suffit d'une légère modification de la tension de batterie pour que l'erreur dans la mesure augmente sensiblement. Autant que possible, la batterie devrait être retirée de l'instrument et la température du bâti et de la coupelle devrait être mesurée en se conformant aux instructions du fabricant ;
- b) Lorsque cela est possible, il convient de mesurer la température du corps de l'appareil et de la

Tableau 7.6. Sources d'erreurs dans les mesures pyrradiométriques

Éléments influençant les mesures	Pyrradiomètres et pyrradiomètres différentiels		Effets sur l'exactitude des mesures	Détermination de ces caractéristiques
	Type à coupelles	Type sans coupelle		
Propriétés des écrans	Caractéristiques spectrales de transmission des coupelles	Néant	a) Variations spectrales du coefficient d'étalonnage b) Effet de la réduction du rayonnement incident due à la diffusion du rayonnement de courtes longueurs d'onde dans les coupelles (dépend de leur épaisseur) c) Effet du vieillissement et d'autres altérations sur la sensibilité du récepteur	a) Analyse spectrophotométrique pour détermination de l'extinction de l'écran b) Mesure de l'effet du rayonnement diffus ou mesure avec angle d'ouverture variable c) Analyse spectrale ; comparaison avec une coupelle neuve ; détermination de l'extinction de la coupelle
Effet de la convection	Effet perturbateur dû aux échanges énergétiques non radiatifs entre récepteur et écran, écran et environnement (résistance thermique)	Effet perturbateur dû aux échanges non radiatifs d'énergie entre l'air et le récepteur (variation du coefficient superficiel d'échange de chaleur)	Effets de perturbations non contrôlables (coups de vent) importants dans le calcul de la divergence du flux radiatif dans la couche inférieure de l'atmosphère	Étude en soufflerie du comportement dynamique de l'instrument en fonction de la vitesse et de la température de l'air
Effet des hydrométéores (pluie, neige, brouillard, rosée, givre) et poussière	Variation de la transmission spectrale plus échange non radiatif de chaleur par conduction et changement d'état	Variation des caractéristiques spectrales du capteur et de la dissipation de la chaleur par évaporation	Effet de perturbation dû à la variation des caractéristiques spectrales du capteur et des échanges énergétiques non radiatifs	Étude de l'influence de la ventilation forcée sur ces effets
Propriétés des surfaces réceptrices	Dépend de l'absorption spectrale de la substance utilisée pour noircir le récepteur		Variation du coefficient d'étalonnage a) en fonction de la réponse spectrale b) en fonction de l'intensité et de l'azimut du rayonnement incident c) en fonction des effets de la température	a) Analyse spectrophotométrique pour vérification de l'étalonnage des surfaces absorbantes b) Mesure de la sensibilité du récepteur sous incidences solaires variables
Effet de température	Non-linéarité du détecteur en fonction de la température		Coefficient de température nécessaire	Étude de l'influence de la ventilation forcée sur ces effets
Effets de l'asymétrie	a) Non-équivalence des capacités et résistances thermiques des deux faces réceptrices b) Différences de la ventilation sur les deux faces réceptrices c) Contrôle et réglage de l'horizontalité du capteur		a) Influence sur la constante de temps instrumentale b) Erreur dans la détermination des coefficients d'étalonnage des deux récepteurs	a) Contrôle de la capacité thermique des deux faces réceptrices b) Contrôle de la constante de temps dans une gamme de température étroite

- coupelle et d'utiliser ces données pour déterminer l'éclairement énergétique ;
- c) L'instrument devrait être ventilé ;
 - d) Pour obtenir les meilleurs résultats possible, l'instrument devrait être protégé des rayons solaires directs par un petit disque asservi au Soleil.

L'étalonnage de ces instruments devrait avoir lieu dans les centres d'étalonnage nationaux ou régionaux à l'aide de radiateurs intégraux ou de pyrémètres de référence.

7.4.2 Instruments pour la mesure du rayonnement total

L'un des problèmes qui se posent avec les instruments destinés à la mesure du rayonnement total est qu'il n'existe pas de surface absorbante dont la sensibilité soit absolument constante pour tout le domaine des longueurs d'onde concernées. De même, il est difficile de trouver des filtres ayant un pouvoir de transmission constant de 300 à 100 000 nm.

Le recours à des capteurs thermiquement sensibles nécessite une bonne connaissance de leur bilan thermique, sans quoi on est forcé de réduire à des valeurs voisines de zéro les pertes de chaleur dues à la convection en protégeant le capteur contre les effets directs du vent. Les difficultés techniques liées à ces pertes sont largement responsables du fait qu'on ne parvienne pas à déterminer les flux énergétiques totaux résultants avec autant d'exactitude que les flux énergétiques globaux. Différents laboratoires ont conçu leurs propres pyrradiomètres en faisant appel aux techniques qui leur paraissent les plus efficaces pour réduire le transfert de chaleur par convection dans le capteur. On a ainsi fabriqué au cours des dernières décennies des instruments dont le fonctionnement, encore loin d'être parfait, repose cependant sur des procédés de mesure dont le principe est valable. Il existe donc une grande variété de pyrradiomètres avec lesquels on emploie, pour éliminer ou prendre en compte l'effet du vent, l'une des méthodes suivantes :

- a) Absence de protection et application de relations empiriques pour corriger les effets du vent ;
- b) Détermination des effets du vent par l'utilisation de chauffage électrique ;
- c) Stabilisation des effets du vent au moyen d'une ventilation artificielle ;
- d) Élimination des effets du vent par protection du capteur.

La composante grandes longueurs d'onde d'un pyrradiomètre est décrite par la formule 7.15

Le tableau 7.6 analyse les sources d'erreur dans les mesures pyrradiométriques et propose des méthodes pour en déterminer les caractéristiques.

Il est malaisé de déterminer l'exactitude qu'il faut s'attendre à obtenir en pratique. Des comparaisons in situ effectuées sur des sites différents entre divers types de pyrradiomètre ont conduit à des résultats accusant des écarts allant jusqu'à 5-10 pour cent dans les meilleures conditions. Pour améliorer les résultats, une étude complète menée en laboratoire devrait précéder les comparaisons in situ en vue de déterminer séparément chacun des effets qui sont à l'origine des écarts.

Afin d'obtenir la meilleure exactitude possible, on doit déduire le rayonnement total après avoir mesuré indépendamment le rayonnement de courtes longueurs d'onde et le rayonnement de grandes longueurs d'onde. Le rayonnement de courtes longueurs d'onde se mesure à l'aide des méthodes décrites dans les sections 7.2 et 7.3, alors que le rayonnement de grandes longueurs d'onde se quantifie au moyen de pyrgéomètres.

Le tableau 7.7 (voir page suivante) énonce les caractéristiques des pyrradiomètres ayant des performances différentes, ainsi que les incertitudes auxquelles on peut s'attendre dans les mesures effectuées à l'aide de ces instruments.

7.4.3 Étalonnage des pyrgéomètres

Les pyrradiomètres et les pyrradiomètres différentiels peuvent être étalonnés pour la mesure du rayonnement de courtes longueurs d'onde de la même manière que les pyranomètres (voir section 7.3.1), avec le Soleil et le ciel comme sources. Dans le cas des pyrradiomètres à un capteur, la surface inférieure doit être recouverte d'une cavité dont la température est connue et stable.

Il est recommandé d'étailler en laboratoire les radiomètres de référence pour la mesure du rayonnement de grandes longueurs d'onde au moyen de cavités de corps noir; de même, il est souhaitable d'effectuer des comparaisons nocturnes avec des instruments de référence plutôt que de procéder à des mesures de réseau. Pour l'étaillage du capteur, le flux descendant, L^- , est mesuré séparément par un pyrgéomètre ou en utilisant une cavité de corps noir. Dans ces conditions, le signal, V , provenant du flux radiatif reçu par l'instrument (via 7.15) se mesure ainsi :

$$V = L^* \cdot K \text{ or } K = V/L^* \quad (7.17)$$

où V est le signal de sortie de l'instrument (μV) et K est la sensibilité ($\mu\text{V}/(\text{W m}^{-2})$).

Tableau 7.7. Spécifications des pyrradiomètres opérationnels

Caractéristiques	Qualité supérieure ^a	Bonne qualité ^b	Qualité moyenne ^c
Résolution (W m^{-2})	1	5	10
Stabilité (changement annuel, en % à fond d'échelle)	2 %	5 %	10 %
Erreur en cosinus à 10° de hauteur	3 %	7 %	15 %
Erreur en azimut à 10° de hauteur (ajoutée à l'erreur en cosinus ; écart par rapport à la moyenne)	3 %	5 %	10 %
Dépendance de la température (-20 à 40 °C ; écart par rapport à la moyenne)	1 %	2 %	5 %
Non-linéarité (écart par rapport à la moyenne)	0,5 %	2 %	5 %
Sensibilité spectrale intégrée sur des intervalles de 200 nm dans la gamme 300 à 75 000 nm	2 %	5 %	10 %

Notes :

- a) Instrument quasiment à la pointe du progrès; ne peut être entretenu qu'aux stations dotées de personnel spécialisé et où sont prévus des programmes spéciaux.
- b) Qualité suffisante pour l'exploitation du réseau.
- c) Convient aux réseaux peu coûteux où des performances moyennes à faibles sont acceptables.

Il faut vérifier périodiquement la sensibilité de l'instrument *in situ* en choisissant soigneusement des conditions ambiantes bien décrites, avec des flux dont la variation est lente. Il faut également contrôler régulièrement les pyrgéomètres pour s'assurer que la transmission du rayonnement de courtes longueurs d'onde n'a pas changé.

La symétrie des pyrradiomètres différentiels exige des vérifications régulières. On procède en retournant l'instrument, ou la paire d'instruments, *in situ* et en prenant note de toutes différences de mesure. Si celles-ci excèdent 2 pour cent de l'échelle complète entre les deux positions, il faut réébalancer l'instrument, car cela peut être dû à des écarts notables soit dans les régimes de ventilation, soit dans les facteurs d'absorption pour les deux capteurs. Ces vérifications devraient également être menées au cours de l'installation et des étalonnages prévus.

7.4.4 Installation des pyrradiomètres et des pyrgéomètres

Les pyrradiomètres et les pyrgéomètres sont généralement installés dans un site libre d'obstacles, ou tout au moins dépourvu d'obstacles dont l'angle d'obstruction serait supérieur à 5° dans toutes les directions, et qui présente un faible angle solaire aux différentes époques de l'année.

Il convient de se livrer quotidiennement à une inspection qui permettra de :

- a) Vérifier la mise à niveau de l'instrument ;
- b) S'assurer que les capteurs et leurs dispositifs de

- protection sont propres et exempts de rosée, de givre, de neige ou de pluie ;
- c) S'assurer qu'il n'y a pas de condensation à l'intérieur des coupelles (et l'éliminer le cas échéant) ;
- d) S'assurer que les surfaces réceptrices recouvertes d'un enduit noir présentent une émissivité très proche de 1.

En outre, dans le cas des coupelles en polythène, il convient de vérifier de temps à autre que leurs caractéristiques de transmission n'ont pas été altérées par l'action des rayons ultraviolets. Il est recommandé de changer la coupelle supérieure deux fois par année.

Comme il n'est généralement pas possible de mesurer directement et avec exactitude le rayonnement réfléchi et le rayonnement ascendant de grandes longueurs d'onde au niveau de la surface, il est nécessaire de placer les pyranomètres et les pyrradiomètres à une certaine distance du sol pour mesurer ces composantes ascendantes. Les mesures intègrent le rayonnement émis par la surface sous-jacente au capteur. Pour les pyranomètres et les pyrradiomètres ayant un angle solide d'ouverture de $2\pi \text{ sr}$ et qui sont installés à deux mètres au-dessus du sol, 90 pour cent de tout le rayonnement mesuré est émis à l'intérieur d'un cercle sous jacent de 12 m de diamètre (95 pour cent dans le cas d'un diamètre de 17,5 m et 99 pour cent pour un diamètre de 39,8 m), en supposant que le capteur utilise un détecteur en cosinus.

Cette propriété d'intégration du rayonnement provenant d'une aire circulaire relativement étendue est avantageuse lorsque le terrain présente de fortes

variations locales d'émissivité, dans la mesure où le pyrradiomètre différentiel est installé assez loin de la surface pour que son champ de vision soit représentatif du terrain en question. Si le capteur est trop près de la surface du sol, l'observation portera sur une portion non représentative du terrain et sera largement influencée par l'ombre de l'instrument. Si, au contraire, le pyrradiomètre différentiel est trop loin du sol, les divergences de flux énergétiques non décelables peuvent rendre les lectures non représentatives des flux réels au voisinage du sol. On adopte habituellement une hauteur de deux mètres quand le sol est recouvert d'une végétation courte et homogène, tandis que dans le cas d'une végétation élevée, une forêt par exemple, la hauteur doit être suffisante pour éliminer adéquatement les hétérogénéités locales.

7.4.5 Enregistrement et réduction des données

De manière générale, les indications de la section 7.1.3 s'appliquent aux pyrradiomètres et aux pyrgéomètres. Les effets suivants peuvent aussi affecter de manière spécifique les lectures de ces radiomètres :

- Effets des hydrométéores (pluie, neige, rosée, givre) sur les instruments non protégés et non ventilés ;
- Effets du vent et de la température atmosphérique ;
- Dérive du zéro du système de données. Cet effet est bien plus important pour les pyrradiomètres, qui peuvent fournir des valeurs négatives, que pour les pyranomètres dont le signal d'éclairement énergétique zéro est lui-même une propriété de l'éclairement énergétique net à la surface du capteur. Il convient de prêter une attention particulière à la position des instruments, si l'on détermine le rayonnement de grandes longueurs d'onde en soustrayant l'éclairement énergétique solaire mesuré par un pyranomètre; il convient d'installer le pyrradiomètre et le pyranomètre à une distance de cinq mètres l'un de l'autre, et de manière à ce que les effets des conditions ambiantes soient pratiquement identiques pour les deux appareils.

7.5 MESURE DES GRANDEURS SPÉCIALES DU RAYONNEMENT

7.5.1 Mesure de l'éclairement naturel

L'éclairement lumineux est le flux incident d'énergie rayonnante émanant d'une source caractérisée par des longueurs d'onde comprises entre 380 et

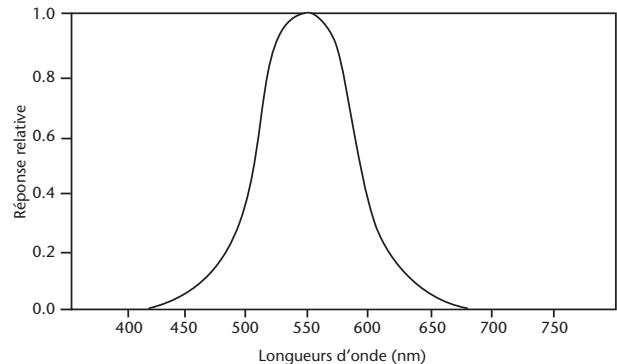


Figure 7.2.
Efficacité lumineuse relative, $V(\lambda)$,
de l'œil humain et vision photopique

780 nm, lequel est pondéré par la réponse de l'œil humain à l'énergie dans ce domaine spectral. La Commission internationale de l'éclairage a défini que l'œil humain réagissait le plus efficacement aux photons à 555 nm. La figure 7.2 et le tableau 7.8 illustrent la réponse relative de l'œil humain normalisée à cette fréquence. L'efficacité lumineuse est définie comme le rapport entre l'exitance énergétique (W m^{-2}) et l'exitance lumineuse (lm). Elle est une fonction de l'efficacité lumineuse relative, $V(\lambda)$,

Tableau 7.8. Valeurs de l'efficacité lumineuse relative spectrale en vision photopique (unité à la longueur d'onde d'efficacité maximale)

Longueur d'onde (nm)	Vision photopique $V(\lambda)$	Longueur d'onde (nm)	Vision photopique $V(\lambda)$
380	0,000 04	590	0,757
390	0,000 12	600	0,631
400	0,000 4	610	0,503
410	0,001 2	620	0,381
420	0,004 0	630	0,265
430	0,011 6	640	0,175
440	0,023	650	0,107
450	0,038	660	0,061
460	0,060	670	0,032
470	0,091	680	0,017
480	0,139	690	0,008 2
490	0,208	700	0,004 1
500	0,323	710	0,002 1
510	0,503	720	0,001 05
520	0,710	730	0,000 52
530	0,862	740	0,000 25
540	0,954	750	0,000 12
550	0,995	760	0,000 06
560	0,995	770	0,000 03
570	0,952	780	0,000 015
580	0,870		

de l'œil humain et d'un facteur de normalisation, K_m (683), décrivant le nombre de lumens émis par watt de rayonnement électromagnétique à partir d'une source monochromatique de 555,19 nm (le point de congélation du platine) :

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (7.18)$$

où Φ_v est le flux lumineux (lm m^{-2} ou lux), $\Phi(\lambda)$ est le flux énergétique spectral ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$), $V(\lambda)$ est l'efficacité lumineuse relative de l'œil humain et K_m est la constante de normalisation reliant les quantités lumineuses aux quantités énergétiques. Ainsi, 99 pour cent du rayonnement visible se trouve entre 400 et 730 nm.

Les grandeurs et unités lumineuses sont données à l'annexe 7.A.

7.5.1.1 Instruments

Les appareils destinés à mesurer l'éclairement lumineux se composent d'un détecteur photovoltaïque, d'un ou plusieurs filtres qui font correspondre la sensibilité à la courbe, $V(\lambda)$, et souvent d'un circuit de régulation de la température servant à maintenir la stabilité du signal. La CIE a publié un guide détaillé des pratiques recommandées pour la mesure de la lumière du jour (CIE, 1994). Ce guide décrit les méthodes à appliquer pour l'installation de l'équipement, la caractérisation des instruments, l'acquisition des données et le contrôle qualité initial.

La mesure de l'éclairement lumineux global est à rapprocher de la mesure de l'éclairement énergétique global. Toutefois, le luminomètre étalon doit être muni d'un dispositif de régulation de la température ou ses mesures doivent être corrigées en fonction d'une gamme de températures allant d'au moins -10 à 40 °C. En outre, l'instrument doit être ventilé afin d'éviter les risques de condensation et/ou de givrage sur la surface extérieure de l'élément sensible. Les instruments de mesure de l'éclairement lumineux doivent normalement pouvoir quantifier les flux compris entre 1 et 20 000 lx. Dans cette plage de valeurs, les incertitudes devraient demeurer dans les limites spécifiées dans le tableau 7.9. Ces valeurs sont fondées sur les recommandations de la CIE (CIE, 1987), mais uniquement pour les incertitudes associées à des instruments de qualité spécialement conçus pour la mesure de la lumière du jour à l'extérieur.

L'éclairement lumineux diffus peut être mesuré selon les mêmes principes appliqués pour la mesure de l'éclairement énergétique diffus. Les mesures

de l'éclairement lumineux direct devraient être effectuées avec des instruments dont le demi angle d'ouverture n'est pas supérieur à $2,85^\circ$ et dont l'angle de pente est inférieur à $1,76^\circ$.

7.5.1.2 Étalonnage

Les étalonnages devraient se rattacher à une source lumineuse étalon de type A, conformément aux procédures décrites par la CIE (1987). Ce matériel ne se trouve normalement que dans les laboratoires d'étalonnage nationaux. Les étalonnages et les tests portant sur les caractéristiques instrumentales devraient avoir lieu chaque année. On devrait aussi procéder à des tests permettant de déterminer le vieillissement, la dérive du zéro, la stabilité mécanique et la stabilité du climat. Il est par ailleurs recommandé de se servir d'un étalon de terrain pour vérifier les étalonnages à chaque site de mesure entre les étalonnages effectués en laboratoire.

7.5.1.3 Enregistrement et réduction des données

La CIE a recommandé l'enregistrement des variables climatologiques ci-après :

- a) Éclairement lumineux global et diffus de la lumière naturelle sur des surfaces horizontales et verticales ;
- b) Éclairement lumineux du rayonnement solaire direct ;
- c) Éclairement lumineux du ciel pour des intervalles de 0,08 sr (environ $10^\circ \cdot 10^\circ$) couvrant tout l'hémisphère céleste ;
- d) Albédo photopique de surfaces caractéristiques telles que le gazon, la terre nue et la neige.

On a généralement besoin de valeurs horaires ou quotidiennes. Les valeurs horaires devraient se référer au temps solaire vrai. Les données se rapportant à l'éclairement lumineux du ciel seraient ultimement présentées sous forme de cartes en projection stéréographique avec des isolignes d'égale luminance.

Tableau 7.9. Spécifications des luxmètres

Spécification	Degré d'incertitude
Correspondance $-V(\lambda)$	2,5
Réponse-rayonnement UV	0,2
Réponse-rayonnement IR	0,2
Réponse en cosinus	1,5
Fatigue à 10 klx	0,1
Coefficient de température	0,1 k^{-1}
Linéarité	0,2
Durée totale de réglage	0,1 s

7.6

MESURE DU RAYONNEMENT ULTRAVIOLET

La mesure du rayonnement solaire ultraviolet est en demande en raison de ses incidences sur l'environnement et la santé humaine et de l'augmentation du rayonnement à la surface de la Terre attribuable à l'appauvrissement de la couche d'ozone (Kerr et McElroy, 1993). Le spectre ultraviolet se divise par convention en trois domaines :

- Le rayonnement UV-A, qui correspond à la bande 315–400 nm, se situe juste en dehors du spectre visible. Il est moins actif sur le plan biologique et son intensité à la surface de la Terre ne varie pas selon la teneur de l'atmosphère en ozone ;
- Le rayonnement UV-B couvre la plage 280–315 nm. Il est actif sur le plan biologique et son intensité à la surface de la Terre dépend de la colonne atmosphérique d'ozone et, dans une certaine mesure, de la longueur d'onde. On exprime fréquemment son activité biologique par l'effet érythémal, qui est la mesure dans laquelle il provoque le rougissement d'une peau humaine claire ;
- Le rayonnement UV-C, qui correspond à la bande 100–280 nm, est entièrement absorbé par l'atmosphère et ne se retrouve pas à l'état naturel à la surface de la Terre.

La bande UV-B est celle à laquelle on s'intéresse le plus pour la mesure du rayonnement ultraviolet. Il existe une autre définition de la limite entre le rayonnement UV-A et UV-B, mais qui n'est plus normalisée: 320 nm au lieu de 315 nm.

La mesure du rayonnement ultraviolet est malaisée du fait de la faible quantité d'énergie qui atteint la surface de la Terre, de la variabilité attribuable aux fluctuations de l'ozone stratosphérique et de l'accroissement rapide du flux avec l'augmentation de la longueur d'onde. La figure 7.3 illustre l'évolution de l'éclairement énergétique spectral, exprimé en $\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$, entre 290 et 325 nm, au sommet de l'atmosphère et en surface. L'éclairement énergétique du rayonnement ultraviolet global est grandement influencé par des phénomènes météorologiques comme les nuages et, à un moindre degré, les aérosols.

L'effet des surfaces avoisinantes doit être également pris en compte en raison des multiples sources de diffusion. C'est le cas notamment dans les zones enneigées.

Les problèmes de normalisation de la mesure du rayonnement UV sont dus à la diversité des applications. Contrairement à la plupart des mesures météorologiques, on n'a pas encore fixé de normes

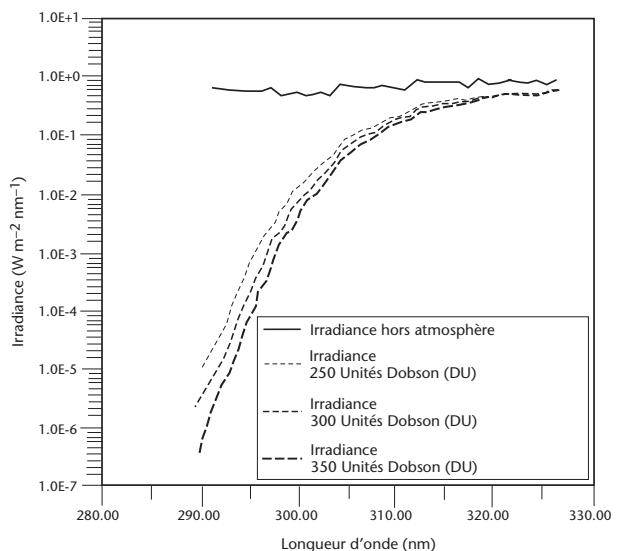


Figure 7.3.
Résultats obtenus à partir de modèles illustrant l'effet d'un accroissement de la quantité d'ozone sur la transmission du rayonnement UV-B dans l'atmosphère

fondées sur les besoins à l'échelle mondiale. Dans de nombreux pays, ce ne sont pas les Services météorologiques qui mesurent le rayonnement ultraviolet, mais les autorités chargées de la santé publique ou de la protection de l'environnement, ce qui complique encore davantage la normalisation des instruments et des méthodes d'observation.

Des directives et des procédures normalisées ont été mises au point pour la caractérisation et l'étalement des spectroradiomètres UV et des radiomètres à filtre UV destinés à mesurer l'éclairement énergétique UV (voir OMM, 1996; 1999a; 1999b; 2001). L'application des procédures recommandées en matière d'assurance qualité des données aux sites qui exploitent des instruments de mesure du rayonnement UV permettront d'établir une base de données utile. Celle-ci est nécessaire pour mettre au point une climatologie de l'éclairement énergétique UV à l'échelle spatio temporelle pour les études du climat terrestre. Ces documents renferment également des recommandations pour les sites d'observation et les spécifications des instruments. Le programme de la VAG de l'OMM (OMM, 1993b et OMM, 2001) a défini les exigences relatives aux mesures du rayonnement UV-B, qui sont reproduites au tableau 7.10 (voir page suivante).

Les descriptions ci-après sont présentées à titre d'information en vue de faciliter le choix des instruments.

7.6.1 Instruments

On trouve dans le commerce trois types généraux d'instruments pour la mesure du rayonnement ultraviolet. Les instruments appartenant à la première

Tableau 7.10.
Conditions de mesure de la densité spectrale globale de l'éclairement énergétique UV-B
Rayonnement UV-B

1. Résolution pour la longueur d'onde : 1,0 nm au maximum
2. Résolution temporelle : 10 minutes au maximum
3. Direction (angulaire) : séparation minimale en éléments directs et diffus ; luminances énergétiques
4. Stratégie méticuleuse d'étalonnage

Données auxiliaires
a) Absolument nécessaires

1. Colonne totale d'ozone (dans un rayon de 100 km)
2. Profondeur optique des aérosols
3. Albédo au sol
4. Nébulosité

b) Hautement recommandées

1. Aérosols, profil LIDAR
2. Répartition verticale de l'ozone
3. Brillance du ciel
4. Éclairement énergétique solaire global
5. Polarisation de la luminance énergétique zénithale
6. Volume de la colonne de vapeur d'eau

catégorie font appel à des filtres à large bande. Ces appareils intègrent le spectre UV-B ou UV-A, ou la totalité du domaine spectral UV susceptible de nuire à la santé humaine. Les instruments de deuxième catégorie comportent un ou plusieurs filtres interférentiels qui touchent des parties discrètes du spectre UV-A ou UV-B. La troisième catégorie englobe les spectroradiomètres qui couvrent séquentiellement une partie prédéfinie du spectre en faisant appel à une bande passante fixe.

7.6.1.1 Capteurs à large bande

La plupart, mais non la totalité, des capteurs à large bande sont conçus pour mesurer un spectre ultraviolet pondéré par la fonction érythémale proposée par McKinlay et Diffey (1987) et reproduite à la figure 7.4. Certains instruments ont un autre spectre d'action, c'est-à-dire celui de Parrish, Jaenicke et Anderson (1982). Deux méthodes (et leurs variations) sont employées pour pondérer le matériel.

Le moyen le plus courant d'obtenir une pondération selon la fonction érythémale est d'éliminer d'abord la quasi totalité des longueurs d'onde du spectre visible au moyen de filtres en verre noir transmettant les rayons ultraviolets. Le rayonnement restant atteint alors un luminophore sensible aux rayons UV. La lumière verte émise par le luminophore est de nouveau filtrée par un verre coloré afin de supprimer toute lumière visible autre que le

verre, avant de parvenir à une photodiode à l'arséniure de gallium ou au phospho arséniure de gallium. La qualité de l'instrument dépend de facteurs tels que la qualité du dôme protecteur extérieur en quartz, la réponse cosinusoidale de l'instrument, sa stabilité thermique et la capacité du fabricant à faire correspondre la courbe d'action érythémale à une combinaison de caractéristiques du verre et de la diode. La stabilité thermique de l'instrument est par ailleurs essentielle en rapport avec les composants électroniques et la réaction du luminophore au rayonnement ultraviolet incident. L'efficacité du luminophore décroît d'environ 0,5 pour cent K⁻¹ et la courbe de réponse aux longueurs d'onde se décale d'environ 1 nm par 10 K. Ce dernier effet est particulièrement important du fait de la forte inclinaison de la courbe de rayonnement à de telles longueurs d'onde.

On a récemment mis au point des instruments qui permettent de mesurer l'éclairement énergétique UV pondéré selon la fonction érythémale au moyen d'un filtre métallique interférentiel à pellicule mince et de photodiodes au silicium spécialement conçues. Cette technologie, qui permet de résoudre de nombreux problèmes liés aux luminophores, présente toutefois des lacunes sur le plan des niveaux de signaux de photodiode et de la stabilité des filtres.

D'autres instruments à large bande font appel à l'une ou l'autre méthode pour mesurer les spectres complets en employant une combinaison de filtres de verre ou de filtres interférentiels. La bande passante se situe entre 20 nm et 80 nm (largeur totale à mi hauteur (LTMH)) pour les instruments qui mesurent une combinaison de rayonnements UV-A et UV-B.

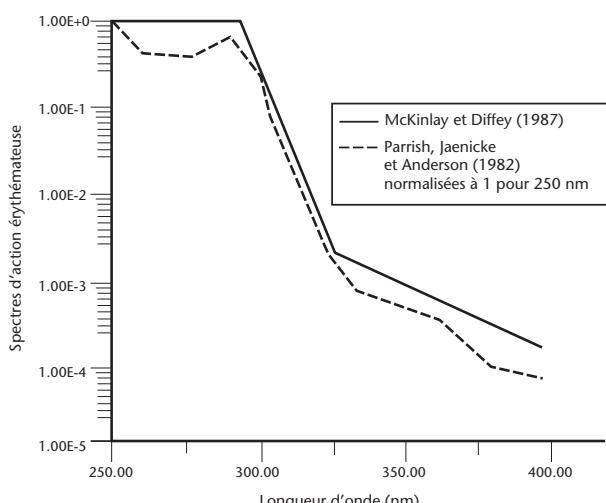


Figure 7.4. Courbes d'action érythémateuse telles que présentées par Parrish, Jaenicke et Anderson (1982) et par McKinlay et Diffey (1987)

Certains fabricants fournissent des algorithmes simples qui permettent d'approcher le dosage érythémal à partir de mesures non pondérées.

L'entretien de ces instruments consiste à veiller à ce que les coupelles soient propres, à ce que les appareils soient de niveau, à ce que le produit déshydratant soit actif (si fourni) et à ce que le système de chauffage/refroidissement fonctionne correctement, si l'équipement en est doté. Pour le reste, il faut procéder comme avec un pyranomètre.

7.6.1.2 Capteurs à bande étroite

La définition d'une bande étroite pour la présente classification des instruments est plutôt vague. La bande passante la plus large pour les instruments de cette catégorie est de 10 nm (LTMH), et, actuellement, la bande passante la plus étroite pour les instruments vendus dans le commerce est de 2 nm (LTMH).

Avec ces capteurs, on utilise un ou plusieurs filtres interférentiels afin d'obtenir de l'information sur une partie des spectres UV. Les instruments les plus simples comportent un filtre unique, généralement à une longueur d'onde qui peut être mesurée par une photodiode de bonne qualité améliorée pour les ultraviolets. Les longueurs d'onde de l'ordre de 305 nm sont caractéristiques de tels instruments. Le rejet hors bande offert par les filtres doit être égal ou supérieur à 10^{-6} dans toute la région sensible du détecteur. Les instruments de qualité supérieure font appel à un dispositif de refroidissement à effet Peltier pour maintenir une température constante avoisinant les 20 °C ou à un appareil de chauffage pour porter la température du filtre et de la diode au-dessus de la température ambiante normale, habituellement 40 °C. Cette dernière solution réduit, toutefois, sensiblement la durée de vie des filtres interférentiels. Une autre configuration de ce type d'instrument consiste à remplacer la photodiode par un tube photomultiplicateur. On peut ainsi mesurer de façon précise l'énergie émanant des courtes longueurs d'onde et les faibles intensités pour toutes les longueurs d'onde mesurées.

Les fabricants d'instruments dotés de plusieurs filtres communiquent généralement une méthode pour reconstituer l'ensemble du spectre ultraviolet grâce à des relations modélisées établies autour des longueurs d'onde mesurées. Des instruments à longueur d'onde unique sont utilisés de façon semblable pour parfaire la résolution spatio temporelle de réseaux de spectromètres plus perfectionnés ou pour contrôler certaines bandes à long terme et de façon précise afin de suivre l'évolution du milieu rayonnant.

Les instruments doivent être conçus de telle façon que le rayonnement traverse le filtre à un angle proche de l'angle normal d'incidence afin d'éviter un décalage spectral vers une longueur d'onde plus courte. Par exemple, un écart de 10° par rapport à l'angle normal d'incidence risque de provoquer un décalage de 1,5 nm, selon l'indice de réfraction du filtre. La température peut également modifier sensiblement la longueur d'onde centrale: environ 0,012 nm K⁻¹ pour les filtres très étroits (< 1 nm).

On procède à l'entretien des instruments à filtre unique de la même façon qu'avec les instruments à large bande. Dans le cas des instruments qui comportent plusieurs filtres sur une roue mobile, l'entretien consiste à vérifier si la roue porte filtres est correctement alignée. Il est par ailleurs recommandé de tester régulièrement l'alimentation haute tension des instruments équipés d'un photomultiplicateur et de contrôler la qualité des filtres.

7.6.1.3 Spectroradiomètres

Les instruments les plus perfectionnés sur le marché sont ceux qui font appel à des réseaux gravés ou holographiques pour disperser l'énergie incidente dans le spectre. La faible énergie du rayonnement ultraviolet par rapport à celle du spectre visible exige un fort rejet hors bande. On y parvient en employant soit un monochromateur double, soit des filtres d'arrêt qui ne transmettent que le rayonnement ultraviolet conjointement avec un monochromateur unique. Certains instruments moins onéreux font appel à des batteries de photodiodes ou de détecteurs à transfert de charge. Ces instruments sont incapables de mesurer l'énergie dans les longueurs d'onde les plus courtes du rayonnement UV-B et posent généralement plus de problèmes associés à la lumière parasite.

Les instruments de contrôle possèdent désormais plusieurs fonctions d'autocontrôle. Les tests électriques consistent à vérifier le fonctionnement du photomultiplicateur et du convertisseur analogique numérique. Les tests visant à déterminer si les dispositifs optiques de l'instrument fonctionnent correctement comportent des vérifications au moyen de lampes internes à vapeur de mercure et de lampes étalons quartz halogène. Si ceux-ci ne permettent pas de procéder à un étalonnage absolu, ils donnent à l'opérateur des indications quant à la stabilité de l'instrument pour ce qui est de l'alignement spectral et l'intensité.

Des instruments vendus dans le commerce sont conçus pour donner des mesures allant de 290 nm jusqu'au milieu du spectre visible, selon leur modèle et leur configuration. La largeur de bande des me-

sures se situe généralement entre 0,5 et 2,0 nm. Le temps nécessaire pour effectuer un balayage complet du réseau dépend de la résolution de longueur d'onde et du spectre total à mesurer. Il peut être de moins d'une minute avec des spectroradiomètres modernes à balayage rapide jusqu'à environ dix minutes avec certains modèles de spec-trophotomètres classiques de qualité, quand il s'agit de balayer le domaine spectral UV et une partie du visible (290 à 450 nm) en procédant par petits pas de longueur d'onde.

La surveillance régulière du rayonnement ultraviolet exige que l'instrument soit protégé du milieu ambiant ou qu'il soit conçu de telle façon que l'énergie incidente qui atteint un récepteur soit transmise à un spectromètre logé dans un réceptacle. Il faut veiller, dans les deux cas, à ce que les composants optiques aient une sensibilité uniforme jusqu'à une faible hauteur angulaire du Soleil.

L'entretien des spectroradiomètres conçus pour la surveillance du rayonnement UV-B doit être confié à un personnel sur place bien formé pour s'occuper de ce type d'instrument. Il est primordial de suivre les instructions du fabricant en raison de la complexité des appareils.

7.6.2 Étalonnage

L'étalonnage de tout capteur servant à l'observation du rayonnement UV-B est à la fois très important et difficile. Des directives sur l'étalonnage des spectroradiomètres UV et des radiomètres à filtre UV sont énoncées dans des publications de l'OMM (1996; 1999a; 1999b; 2001) et dans des documents spécialisés. Contrairement aux pyranomètres, qui sont rattachés à une série d'instruments normalisés étalonnés par rapport à la Référence radiométrique mondiale (RRM), ces capteurs doivent être étalonnés par rapport à des sources lumineuses ou à des détecteurs à filtre. Bien que ces derniers dispositifs soient prometteurs pour l'étalonnage à long terme des instruments à filtre à bande étroite, ils ne sont pas encore faciles à trouver sur le marché. C'est pourquoi l'emploi de lampes étalonnées par raccordement à des laboratoires nationaux de normalisation reste le moyen le plus courant d'étalonner les capteurs de rayonnement UV-B. Les nombreux pays qui ne disposent pas de laboratoires capables de caractériser les lampes dans l'ultraviolet utilisent des lampes habituellement rattachées au National Institute of Standards and Technology des États-Unis d'Amérique ou au Physikalisch-Technische Bundesanstalt allemand.

On estime qu'il n'est possible actuellement d'atteindre une incertitude de 5 pour cent dans les mesures

ponctuelles à 300 nm que dans les conditions les plus rigoureuses. L'incertitude associée aux mesures des totaux quotidiens est environ la même, selon les meilleures pratiques. Afin d'obtenir des totaux quotidiens représentatifs de l'éclairement spectral UV, il convient de procéder à des balayages spectraux rapides avec des intervalles d'échantillonnage réduits entre les balayages lorsque l'ennuagement et/ou l'épaisseur optique des nuages évolue rapidement. L'incertitude entachant les mesures de l'activité érythémale est généralement de l'ordre de 5 à 20 pour cent, selon divers facteurs parmi lesquels la qualité des procédures et de l'équipement. Les sources d'erreur, qui sont étudiées dans les paragraphes ci-après, comprennent:

- a) Les incertitudes associées aux lampes étalons ;
- b) La stabilité des instruments, et notamment la stabilité du filtre spectral ainsi que, pour les instruments plus anciens, les coefficients de température ;
- c) Les effets cosinusoidaux ;
- d) La variabilité de l'étalonnage des instruments en fonction de la longueur d'onde et :
 - Le fait que le spectre d'une lampe étalon n'est pas le même que le spectre mesuré ;
 - Le fait que le spectre du rayonnement UV-B mesuré varie fortement en fonction de la distance zénithale du Soleil.

Le recours aux lampes étalons comme sources d'étalonnage conduit à des incertitudes importantes aux longueurs d'onde les plus courtes, même si le transfert de l'étalonnage est parfait. À 350 nm, par exemple, l'incertitude associée à l'éclairement énergétique standard est de l'ordre de 1,3 pour cent; lors du transfert vers une lampe étalon, on ajoute une incertitude de l'ordre de 0,7 pour cent. Soulignons que les incertitudes d'étalonnage diminuent avec l'augmentation des longueurs d'onde. Il faut également porter attention au montage et au maniement des lampes étalons. Des variations de courant électrique, ne serait-ce que de 1 pour cent, peuvent provoquer des erreurs de flux UV de 10 pour cent ou plus aux longueurs d'onde les plus courtes. Une mesure incorrecte de la distance qui sépare la lampe et l'instrument à étalonner peut également entraîner des erreurs de l'ordre de 1 pour cent, du fait que la loi de l'inverse du carré s'applique à l'étalonnage. Webb et al. (1994) abordent divers aspects de l'incertitude associée à l'emploi de lampes étalons pour l'étalonnage des spectroradiomètres dans l'ultraviolet ou le visible.

Si les instruments à large bande sont les moins chers à l'achat, leurs caractéristiques sont en revanche les plus difficiles à déterminer. Ces instruments posent divers problèmes: a) ensemble complexe de filtres employés pour intégrer le rayonnement incident

au signal d'action érythémale; et b) fluctuation de la nature spectrale de l'atmosphère en fonction de la masse d'air et de la quantité d'ozone. Même si la détermination des caractéristiques de l'instrument au moyen de lampes étalonnées est parfaite, les écarts entre le spectre solaire mesuré et le spectre de la lampe jouent sur l'incertitude des mesures finales. L'emploi de lampes à deutérium à rendement élevé et d'un monochromateur double, ainsi qu'une sélection rigoureuse des filtres peuvent faciliter la caractérisation des appareils, mais rares sont les laboratoires capables d'effectuer ce type d'étalonnage.

Il est plus facile de caractériser les capteurs à bande étroite car l'intensité des sources d'étalonnage varie moins dans les longueurs d'onde plus courtes. On peut avoir recours avec bonheur à des détecteurs à filtre avec les capteurs à bande étroite, mais à ce jour, ils n'ont été utilisés que dans le cadre de travaux de recherche. Lorsque l'on procède au réétalonnage de ces instruments, qu'ils soient à filtre unique ou à filtres multiples, il faut prendre soin de vérifier que les caractéristiques spectrales des filtres n'ont pas changé dans le temps.

L'étalonnage des spectromètres est une opération simple à condition que les instruments aient été entretenus entre les étalonnages. Ici encore, il faut souligner que le transfert à partir d'une lampe étalon est difficile en raison du soin qu'il faut apporter dans la position où les mesures vont être effectuées, car un changement d'orientation peut diminuer l'efficacité de nombreux spectroradiomètres. Lors de l'étalonnage d'un spectromètre, il convient également de vérifier l'exactitude du réglage de longueur d'onde du monochromateur, ainsi que l'alignement

et la propreté des dispositifs optiques internes et de soumettre les composants électroniques à des tests généraux. Il est également conseillé de vérifier périodiquement le rejet hors bande, en effectuant éventuellement un balayage à l'aide d'un laser hélium cadmium ($\lambda = 325$ nm).

La plupart des fabricants d'instruments à filtres préconisent un étalonnage tous les ans. Les spectroradiomètres devraient être étalonnés au moins deux fois par an s'ils ne disposent pas de fonctions d'autocontrôle du signal de sortie du photomultiplicateur ou de la sélection de la longueur d'onde. Dans tous les cas, les étalonnages absolus ne doivent être réalisés régulièrement que par des techniciens qualifiés sur les sites. Les sources employées pour l'étalonnage doivent garantir le rattachement à des étalons radiométriques absolus conservés par des laboratoires réputés de métrologie. Dans l'éventualité où les vérifications courantes d'assurance qualité indiqueraient une diminution notable de la performance de l'instrument ou une variation de son étalonnage avec le temps, il pourrait être nécessaire de procéder à un réétalonnage entre deux étalonnages prévus. Tous les étalonnages devraient être effectués par du personnel compétent et être fondés sur la documentation présente sur le site et sur les directives et procédures recommandées publiées, notamment par l'OMM (1996; 1999a; 1999b; 2001). Outre les étalonnages absolus, il peut être utile de procéder à des comparaisons entre les sources employées pour l'étalonnage, par exemple les lampes et les instruments de mesure, afin de déceler et éliminer les incohérences ou les écarts systématiques dans les résultats obtenus avec les instruments aux différents sites.

ANNEXE 7.A

NOMENCLATURE DES GRANDEURS ÉNERGÉTIQUES ET LUMINEUSES

1) Grandeur énergétiques

Nom	Symbol	Unité	Relation	Remarques
Énergie	$Q (W)$	$J = W \cdot s$		
Flux énergétique	$\Phi, (P)$	W	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Puissance
Densité de flux énergétique	$(M), (E)$	$W \cdot m^{-2}$	$d\Phi = \frac{d^2 Q}{dA \cdot dt}$	Flux énergétique de toute origine traversant un élément de surface
Exitance énergétique	M	$W \cdot m^{-2}$	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	Flux énergétique de toute origine émis par un élément de surface
ÉCLAIREMENT énergétique	E	$W \cdot m^{-2}$	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Flux énergétique de toute origine reçu par un élément de surface
Luminance énergétique	L	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$L = \frac{d^2 \Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos \theta}$	La luminance énergétique est une grandeur conservatrice dans un système optique
Exposition énergétique (irradiation)	H	$J \cdot m^{-2}$	$H = \frac{dQ}{dA} = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot dt$	Peut être utilisée pour les sommes journalières du rayonnement global, etc.
Intensité énergétique	I	$W \cdot sr^{-1}$	$I = \frac{d\Phi}{d}$	Peut être utilisée uniquement pour un rayonnement émis par des «sources ponctuelles»

2) Grandeur lumineuses

Nom	Symbol	Unité
Quantité de lumière	Q_v	$lm \cdot s$
Flux lumineux	Φ_v	lm
Exitance lumineuse	M_v	$lm \cdot m^{-2}$
ÉCLAIREMENT lumineux	E_v	$lm \cdot m^{-2} = lx$
Exposition lumineuse	H_v	$lm \cdot m^{-2} \cdot s = lx \cdot s$
Intensité lumineuse	I_v	$lm \cdot sr^{-1} = cd$
Luminance	L_v	$lm \cdot m^{-2} \cdot s \cdot r^{-1} = cdm^{-2}$
Densité de flux lumineux	$(M_v; E_v)$	$lm \cdot m^{-2}$

3) Catactéristiques optiques

<i>Caractéristique</i>	<i>Symbol</i>	<i>Définition</i>	<i>Remarques</i>
Facteur d'émission	ϵ	$\epsilon = \frac{M_\epsilon}{M_{\epsilon=1}}$	$\epsilon = 1$ pour un corps noir
Facteur d'absorption	α	$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$	Φ_a et Φ_b désignent respectivement les flux énergétiques absorbé et incident
Facteur de réflexion	ρ	$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$	Φ_r est le flux énergétique réfléchi
Facteur de transmission	τ	$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$	Φ_t est le flux énergétique transmis à flux énergétiques absorbé et incident
Épaisseur optique	δ	$\tau = e^{-\delta}$	Dans l'atmosphère δ est normalement défini pour une direction verticale. Une épaisseur optique vaut $\delta / \cos \theta$, où θ est l'angle zénithal apparent

ANNEXE 7.B

GRANDEURS, SYMBOLES ET DÉFINITIONS POUR LES MESURES DE RAYONNEMENT EN MÉTÉOROLOGIE

<i>Grandeur</i>	<i>Symbole</i>	<i>Relation</i>	<i>Définitions et remarques</i>	<i>Unités</i>
Rayonnement descendant			Composante descendante	
	$\Phi \downarrow^a$	$\Phi \downarrow = \Phi_g \downarrow + \Phi_i \downarrow$	flux énergétique	W
	$Q \downarrow$	$Q \downarrow = Q_g \downarrow + Q_i \downarrow$	énergie rayonnante	J (W s)
	$M \downarrow$	$M \downarrow = M_g \downarrow + M_i \downarrow$	exitance ^b énergétique	$W \text{ m}^{-2}$
	$E \downarrow$	$E \downarrow = E_g \downarrow + E_i \downarrow$	éclairement énergétique	$W \text{ m}^{-2}$
	$L \downarrow$	$L \downarrow = L_g \downarrow + L_i \downarrow$	luminance énergétique	$W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
	$H \downarrow$	$H \downarrow = H_g \downarrow + H_i \downarrow$ (g = rayonnement global) (i = grandes longueurs d'ondes)	exposition énergétique pour un intervalle de temps spécifié	$J \text{ m}^{-2}$ par intervalle de temps
Rayonnement ascendant			Composante ascendante	
	$\Phi \uparrow^a$	$\Phi \uparrow = \Phi_r \uparrow + \Phi_i \uparrow$	flux énergétique	W
	$Q \uparrow$	$Q \uparrow = Q_r \uparrow + Q_i \uparrow$	énergie rayonnante	J (W s)
	$M \uparrow$	$M \uparrow = M_r \uparrow + M_i \uparrow$	exitance énergétique	$W \text{ m}^{-2}$
	$E \uparrow$	$E \uparrow = E_r \uparrow + E_i \uparrow$	éclairement énergétique	$W \text{ m}^{-2}$
	$L \uparrow$	$L \uparrow = L_r \uparrow + L_i \uparrow$	luminance énergétique	$W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
	$H \uparrow$	$H \uparrow = H_r \uparrow + H_i \uparrow$	exposition énergétique pour un intervalle de temps spécifié	$J \text{ m}^{-2}$ par intervalle de temps
Rayonnement global	$E_g \downarrow$	$E_g \downarrow = E \cos \theta_{\odot} + E_d \downarrow$	Éclairement énergétique hémisphérique sur une surface horizontale (θ_{\odot} = distance zénithale apparente du soleil) ^c	$W \text{ m}^{-2}$
Rayonnement du ciel : rayonnement solaire diffus	$\Phi_d \downarrow$ $Q_d \downarrow$ $M_d \downarrow$ $E_d \downarrow$ $L_d \downarrow$ $H_d \downarrow$		indice d = diffus	Comme pour le rayonnement descendant
Rayonnement ascendant/descendant de grandes longueurs d'onde	$\Phi_i \uparrow, \Phi_d \downarrow$ $Q_i \uparrow, Q_d \downarrow$ $M_i \uparrow, M_d \downarrow$ $E_i \uparrow, E_d \downarrow$ $H_i \uparrow, H_d \downarrow$		Indice i / = grandes longueurs d'onde. Si le rayonnement atmosphérique est uniquement considéré, l'indice a peut être ajouté, $\Phi_{i,a} \uparrow \sigma \sigma$	Comme pour le rayonnement descendant
Rayonnement solaire réfléchi	$\Phi_r \uparrow$ $Q_r \uparrow$ $M_r \uparrow$ $E_r \uparrow$ $L_r \uparrow$ $H_r \uparrow$		Indice r = réfléchi (les indices s = spéculaire et d = diffus peuvent être utilisés s'il y a lieu de distinguer ces deux composantes)	Comme pour le rayonnement descendant
Rayonnement total résultant	Φ^* Q^* M^* E^* L^* H^*	$\Phi^* = \Phi \downarrow - \Phi \uparrow$ $Q^* = Q \downarrow - Q \uparrow$ $M^* = M \uparrow - M \downarrow$ $E^* = E \downarrow - E \uparrow$ $L^* = L \downarrow - L \uparrow$ $H^* = H \downarrow - H \uparrow$	les indices g ou $/$ sont à ajouter à chacun des symboles si l'on considère uniquement les valeurs de rayonnement total résultant de courtes ou de grandes longueurs	Comme pour le rayonnement descendant

<i>Grandeur</i>	<i>Symbole</i>	<i>Relation</i>	<i>Définitions et remarques</i>	<i>Unités</i>
Rayonnement solaire direct	E	$E = E_0 \tau \nu e^{-\delta} / \cos \theta_\odot$	τ = transmittance atmosphérique δ = épaisseur optique (verticale)	W m^{-2}
Constante solaire	E_0		Éclairement énergétique solaire, normalisé par rapport à la distance moyenne Terre-Soleil	W m^{-2}

- a) Les symboles – ou + peuvent être utilisés au lieu de \downarrow^- ou \uparrow^+ (p.ex., Φ^- ou Φ^+).
- b) L'exitance est le flux énergétique émis par unité de surface; l'éclairement énergétique est le flux énergétique reçu par unité de surface. Le symbole M ou E peut être utilisé pour la densité du flux. Même si cela n'est pas spécifiquement recommandé, on peut également introduire le symbole F , défini comme $\Phi/\text{surface}$.
- c) Dans le cas des surfaces inclinées, θ_\odot est l'angle entre la perpendiculaire à la surface et la direction par rapport au Soleil.

ANNEXE 7.C

SPÉCIFICATIONS POUR LES CENTRES RADIOMÉTRIQUES RÉGIONAUX, NATIONAUX ET MONDIAUX

Centres radiométriques mondiaux

À sa trentième session tenue en 1978, le Comité exécutif avait désigné par sa résolution 11 (EC XXX) les centres radiométriques mondiaux qui devaient être utilisés pour les comparaisons internationales des étalons de mesure radiométriques faites en météorologie dans les stations du réseau mondial et pour la conservation des instruments de référence destinés à cette fin.

Un centre radiométrique mondial doit répondre aux exigences suivantes :

1. a) Il possède et entretient un groupe d'au moins trois pyrhéliomètres absolus stables dont le niveau d'incertitude identifiable (95 pour cent) est inférieur à 1 W m^{-2} par rapport à la Référence radiométrique mondiale et dont 95 pour cent des mesures de l'éclairement énergétique direct du Soleil, dans des conditions ensoleillées stables présentant un éclairement énergétique direct supérieur à 700 W m^{-2} , se situent à moins de 4 W m^{-2} de la valeur réelle. Le Centre mondial de données sur le rayonnement (Davos) est invité à maintenir le Groupe étalon mondial en vue de l'établissement de la Référence radiométrique mondiale ;
- b) Il forme des spécialistes du rayonnement ;
- c) Son personnel est suffisant pour assurer la continuité du service et comprend des scientifiques qualifiés détenant une vaste expérience dans le domaine du rayonnement ;
- d) Il met tout en œuvre pour que ses étalons et appareils d'essai présentent en permanence la plus grande qualité possible ;
- e) Il assure le transfert de la Référence radiométrique mondiale vers les centres régionaux ;
- f) Il dispose des équipements de laboratoire et des installations extérieures nécessaires pour effectuer de manière simultanée la comparaison d'un grand nombre d'instruments et procéder à la réduction des données ;
- g) Il se tient informé ou est à l'origine de l'évolution des normes ou des méthodes qui sont employées en radiométrie météorologique ;
- h) Il est évalué par un organisme international ou par des experts de la CIMO au moins tous les cinq ans, de manière à vérifier la traçabilité des mesures du rayonnement solaire direct ; ou

2. a) Il établit et tient à jour des archives de données sur le rayonnement solaire provenant de tous les Membres de l'OMM ;
- b) Son personnel est suffisant pour assurer la continuité du service et comprend des scientifiques qualifiés ayant une vaste expérience dans le domaine du rayonnement ;
- c) Il prend toutes les mesures nécessaires afin d'assurer en permanence un niveau très élevé tant en matière de qualité que pour ce qui est de l'accès à sa base de données ;
- d) Au moins tous les cinq ans, il fait l'objet d'une évaluation effectuée par un organisme international ou par des experts de la CIMO.

Centres radiométriques régionaux

Les centres radiométriques régionaux sont chargés par les conseils régionaux de procéder à la comparaison d'instruments de mesure du rayonnement à l'intérieur de la Région et de conserver les instruments étalons voulus pour ce faire.

Tout centre radiométrique régional doit remplir les conditions suivantes avant sa désignation et continuer de les remplir par la suite :

- a) Il possède et entretient un groupe étalon formé d'au moins trois pyrhéliomètres stables dont le niveau d'incertitude identifiable (95 pour cent) est inférieur à 1 W m^{-2} par rapport à la Référence radiométrique mondiale et dont 95 pour cent des mesures de l'éclairement énergétique direct du Soleil, dans des conditions ensoleillées stables présentant un éclairement énergétique direct supérieur à 700 W m^{-2} , se situent à moins de 6 W m^{-2} de la valeur réelle ;
- b) Il fait en sorte que l'un des radiomètres soit, au moins une fois tous les cinq ans, comparé au Groupe étalon mondial, dans le cadre d'une comparaison approuvée par l'OMM (CIMO), ou étalonné ;
- c) Ses radiomètres étalons sont comparés entre eux au moins une fois par an dans le but de vérifier la stabilité de chaque instrument. Si le coefficient moyen, calculé sur au moins 100 mesures avec un niveau d'incertitude (95 pour cent) inférieur à 0,1 pour cent, a changé de plus de 0,2 pour cent et s'il est impossible de déterminer l'instrument en cause, un étalonnage

- doit être effectué dans l'un des centres radiométriques mondiaux avant toute nouvelle utilisation des radiomètres comme étalons ;
- d) Il dispose des équipements de laboratoire et des installations extérieures nécessaires pour vérifier et maintenir l'exactitude du matériel auxiliaire, ou y a accès ;
 - e) Il dispose des installations extérieures nécessaires pour effectuer de manière simultanée la comparaison des radiomètres étalons nationaux dans la Région ;
 - f) Son personnel est suffisant pour assurer la continuité du service et comprend un scientifique qualifié détenant une vaste expérience dans le domaine du rayonnement ;
 - g) Il est évalué par un organisme national ou international ou par des experts de la CIMO au moins tous les cinq ans, de manière à vérifier la traçabilité des mesures du rayonnement solaire direct.

Centres radiométriques nationaux

Les centres radiométriques nationaux sont désignés au niveau d'un pays. Ils sont chargés de procéder à l'étalonnage, à la normalisation et à la vérification des instruments qui sont utilisés dans le réseau national de stations radiométriques et de conserver les instruments étalons voulus pour ce faire.

Tout centre radiométrique national doit remplir les conditions suivantes :

- a) Il possède et entretient au moins deux pyrhéliomètres devant servir d'instruments de référence nationaux pour l'étalonnage des instruments de mesure du rayonnement dans le réseau national de stations radiométriques dont le niveau d'incertitude identifiable (95 pour cent) est inférieur à 4 W m^{-2} par rapport à la représentation régionale de la Référence radiométrique mondiale et dont 95 pour cent des mesures de l'éclairement énergétique direct du Soleil, dans des conditions ensoleillées stables présentant un éclairement énergétique direct supérieur à 700 W m^{-2} , se situent à moins de 20 W m^{-2} de la valeur réelle ;
- b) Il fait en sorte que l'un des radiomètres étalons nationaux soit comparé à un étalon régional au moins une fois tous les cinq ans ;
- c) Ses radiomètres étalons sont comparés entre eux au moins une fois par an dans le but de vérifier la stabilité de chaque instrument. Si le coefficient moyen, calculé sur au moins 100 mesures avec un niveau d'incertitude (95 pour cent) inférieur à 0,2 pour cent, a changé de plus de 0,6 pour cent et s'il est impossible de déterminer l'instrument en cause, un étalon-

- nage doit être effectué dans l'un des centres radiométriques régionaux avant toute nouvelle utilisation des radiomètres comme étalons ;
- d) Il dispose des équipements et des installations nécessaires pour vérifier le fonctionnement des instruments qui sont utilisés dans le réseau national, ou y a accès ;
 - e) Son personnel est suffisant pour assurer la continuité du service et comprend un scientifique qualifié détenant une expérience dans le domaine du rayonnement.

Les centres radiométriques nationaux sont tenus d'élaborer et de tenir à jour toutes les instructions techniques nécessaires au bon fonctionnement et à l'entretien du réseau national de stations radiométriques.

Les dispositions sont prises pour assembler les résultats de toutes les mesures du rayonnement effectuées au sein du réseau national de stations radiométriques et pour vérifier soigneusement et régulièrement ces résultats en vue de garantir leur exactitude et leur fiabilité. Si ces tâches sont confiées à un autre organisme, le centre radiométrique national doit être en relation étroite avec celui-ci.

Liste des Centres radiométriques mondiaux et régionaux

Centres radiométriques mondiaux

- Davos (Suisse)
- Saint-Pétersbourg² (Fédération de Russie)

Centres radiométriques régionaux

Région I (Afrique) :

- Le Caire (Égypte)
- Khartoum (Soudan)
- Kinshasa (République démocratique du Congo)
- Lagos (Nigéria)
- Tamanrasset (Algérie)
- Tunis (Tunisie)

Région II (Asie) :

- Pune (Inde)
- Tokyo (Japon)

Région III (Amérique du Sud) :

- Buenos Aires (Argentine)
- Santiago (Chili)
- Huayao (Pérou)

² Principalement exploité à titre de Centre mondial de données sur le rayonnement, en vertu du plan stratégique de la Veille de l'atmosphère globale.

Région IV (Amérique du Nord, Amérique centrale et Caraïbes) :

- Toronto (Canada)
- Boulder (États-Unis d'Amérique)
- Mexico/Colima (Mexique)

Région V (Pacifique Sud-Ouest) :

- Melbourne (Australie)

Région VI (Europe) :

- Budapest (Hongrie)
- Davos (Suisse)
- Saint-Pétersbourg (Fédération de Russie)
- Norrköping (Suède)
- Carpentras (France)
- Uccle (Belgique)
- Lindenberg (Allemagne)

ANNEXE 7.D

FORMULES UTILES

Données générales

Toutes les données astronomiques peuvent se calculer à l'aide des tables qui figurent dans les almanachs nautiques ou des tables astronomiques (éphémérides); mais on utilise aussi des équations d'approximation à des fins pratiques. Michalsky (1988a, b) a conclu, après avoir comparé plusieurs séries de formules d'approximation, que celles qui convenaient le mieux étaient les équations présentées comme des approximations pratiques dans l'Astronomical Almanac (United States Naval Observatory, 1993). Celles-ci sont reproduites ci-après à toutes fins utiles.

Position du Soleil

Pour déterminer la position réelle du Soleil, les valeurs suivantes doivent être connues :

- a) L'année ;
- b) Le jour de l'année (par exemple, le 1^{er} février est le jour 32) ;
- c) L'heure décimale en temps universel (par exemple, heures + minute/60 + écart horaire par rapport à Greenwich en heures rondes ?) ;
- d) La latitude en degrés (hémisphère Nord : valeur positive) ;
- e) La longitude en degrés (Est ? : valeur positive).

Pour déterminer le jour julien (JJ), on fait appel à l'*Astronomical Almanac*, qui détermine le jour julien actuel à partir d'un jour julien de référence fixé au 1^{er} janvier 2000 à midi en temps universel (TU). Ce JJ correspond à 2 451 545,0. Le jour julien à déterminer se calcule comme suit :

$$JJ = 2\ 432\ 916,5 + \text{delta} \cdot 365 + \text{jours intercalaires} + \text{jour} + \text{heure}/24$$

où

delta = année - 1949 ;

jours intercalaires = partie entière de (delta/4).

La constante 2 432 916,5 est le jour julien correspondant à 0000 1^{er} janvier 1949 et n'est utilisée que par commodité.

En utilisant le temps susmentionné, les coordonnées écliptiques peuvent se calculer en procédant par étapes, comme suit (L, g et l sont exprimés en degrés) :

- a) $n = JJ - 2\ 451\ 545$;

- b) L (longitude moyenne) = $280,460 + 0,985\ 647\ 4 \cdot n$ ($0 \leq L < 360^\circ$) ;
- c) g (anomalie moyenne) = $357,528 + 0,985\ 600\ 3 \cdot n$ ($0 \leq g < 360^\circ$) ;
- d) l (longitude céleste) = $L + 1,915 \cdot \sin(g) + 0,020 \cdot \sin(2g)$ ($0 \leq l < 360^\circ$) ;
- e) ep (obliquité de l'écliptique) = $23,439 - 0,000\ 000\ 4 \cdot n$ (degrés).

Il convient de noter que d'après les spécifications, tous les multiples de 360° devraient être ajoutés ou soustraits jusqu'à ce que la valeur finale s'inscrive dans la marge recommandée.

À l'aide des équations susmentionnées, les coordonnées célestes, l'ascension droite (ra) et la déclinaison (dec), peuvent se calculer comme suit :

$$\tan(ra) = \cos(ep) \cdot \sin(l)/\cos(l)$$

$$\sin(dec) = \sin(ep) \cdot \sin(l)$$

Pour convertir les coordonnées célestes en coordonnées locales, c'est-à-dire l'ascension droite et la déclinaison en azimut (A) et altitude (a), il est recommandé d'utiliser l'angle horaire local (h). À cette fin, il faut d'abord déterminer le temps sidéral moyen de Greenwich (GMST, en heures) et le temps sidéral moyen local (LMST) :

$$GMST = 6,697\ 375 + 0,065\ 709\ 824\ 2 \cdot n + \text{heure (TU)}$$

où

$$0 \leq GMST < 24h$$

$$LMST = GMST + (\text{longitude est})/(15^\circ h^{-1})$$

Si l'on prend LMST, l'angle horaire (ha) se calcule comme suit (ha et ra sont en degrés) :

$$ha = LMST - 15 \cdot ra \quad (-12 \leq ha < 12h)$$

Avant que le Soleil n'atteigne le méridien, l'angle horaire est négatif. Il faut faire preuve de prudence en utilisant ce terme car certains chercheurs font l'inverse.

La hauteur du Soleil (el) et l'azimut du Soleil (az) peuvent se calculer par les relations suivantes (az et el sont exprimés en degrés) :

$$\begin{aligned} \sin(el) &= \\ \sin(dec) \cdot \sin(lat) + \cos(dec) \cdot \cos(lat) \cdot \cos(ha) &= \end{aligned}$$

et :

$$\sin (az) = -\cos (dec) \cdot \sin (ha)/\cos (el)$$

$$\cos(az) = (\sin(dec) - \sin(el) \cdot \sin(lat)) / (\cos(el) \cdot \cos(lat))$$

où l'azimut est compté à partir du Nord (0°), avec des valeurs positives vers l'Est.

Pour tenir compte de la réfraction atmosphérique et déduire la hauteur apparente du Soleil (h) ou la distance zénithale apparente du Soleil, l'*Astronomical Almanac* propose les équations suivantes :

- a) Une expression simple pour la réfraction R dans le cas de distances zénithales inférieures à 75° :

$$r = 0^\circ,004\ 52 P \tan z/(273 + T)$$

où z est la distance zénithale en degrés, P est la pression en hectopascals et T est la température en $^\circ\text{C}$.

- b) Pour les distances zénithales supérieures à 75° et les altitudes inférieures à 15° , la formule d'approximation ci-après est recommandée :

$$r = \frac{P(0.159\ 4 + 0.019\ 6a + 0.000\ 02a^2)}{[(273 + T)(1 + 0.505a + 0.084\ 5a^2)]}$$

où a est l'altitude ($90^\circ - z$), $h = el + r$ et la distance zénithale apparente du Soleil est $z_o = z + r$.

Distance Terre Soleil

Même si elle est peu importante à notre époque, l'excentricité de l'orbite que la Terre décrit autour du Soleil est néanmoins suffisante pour que le carré de la distance Terre Soleil, et donc l'éclairement énergétique solaire à la surface du globe, varie de 3,3 pour cent par rapport à la moyenne. En unités astronomiques, avec une incertitude de 10 4, la relation est la suivante :

$$R = 1,000\ 14 - 0,016\ 71 \cdot \cos(g) - 0,000\ 14 \cdot \cos(2g)$$

où g est l'anomalie moyenne définie ci-dessus. L'excentricité est définie comme le carré de la distance moyenne Terre Soleil (1 UA, R_o) divisée par la distance réelle Terre Soleil :

$$E_o = (R_o/R)^2$$

Masse d'air

On doit connaître, pour le calcul de l'extinction, la longueur du trajet parcouru par le rayonnement à travers l'atmosphère, appelée masse d'air optique absolue. La masse d'air relative pour un quelconque constituant atmosphérique, m , est le rapport entre la masse d'air le long du trajet oblique et la masse d'air à la verticale du lieu; il s'agit donc d'un facteur de normalisation. Dans le cas d'une atmosphère plane parallèle, sans réfraction, m est égal à $1/\sin h_o$ ou $1/\cos z_o$.

Temps local apparent

Le temps solaire moyen, sur lequel se fonde notre temps civil, est déduit du mouvement d'un corps imaginaire, appelé Soleil moyen, dont on suppose qu'il se déplace sur l'équateur céleste à une vitesse uniforme égale à la vitesse moyenne du mouvement du Soleil vrai. La différence entre ce temps adopté comme référence et le temps local apparent qui est variable, est appelée équation du temps, Eq , qui peut être positive ou négative selon les positions relatives du Soleil vrai et du Soleil moyen :

$$LAT = LMT + Eq = CT + LC + Eq$$

où LAT est le temps local apparent (également appelé temps solaire vrai (TSV)), LMT est le temps local moyen, CT est le temps civil (appelé aussi temps légal parce qu'il se réfère à un méridien donné) et LC est la correction de longitude (4 minutes par degré). LC est positive si le méridien local est à l'est du méridien de référence et vice-versa.

Pour le calcul de Eq , en minutes, on peut adopter l'expression suivante :

$$Eq = 0,0172 + 0,4281 \cos \Theta_o - 7,3515 \sin \Theta_o - 3,349\ 5 \cos 2\Theta_o - 9,361\ 9 \sin 2\Theta_o$$

où $\Theta_o = 2 \pi d_n / 365$ en radians ou $\Theta_o = 360 d_n / 365$ en degrés, et où d_n est le numéro du jour, qui va de 0 pour le 1^{er} janvier à 364 ou 365 pour le 31 décembre, selon qu'il s'agit d'une année normale ou bissextile. L'erreur maximale de cette équation d'approximation est 35 secondes (ce qui est excessif pour certaines applications, comme la détermination de la masse d'air).

ANNEXE 7.E

RAYONNEMENT SOLAIRE DIFFUS CORRECTION POUR UN ARCEAU D'OMBRAGE

L'arceau d'ombrage est monté sur deux rails orientés parallèlement à l'axe de la Terre, de telle manière que le centre de l'arceau coïncide avec celui du pyranomètre aux équinoxes. Le diamètre de l'arceau est compris entre 0,5 et 1,5 m et le rapport entre la largeur et le rayon b/r est compris entre 0,09 et 0,35. L'ajustement de la position de l'arceau en fonction de la déclinaison du Soleil s'opère en faisant glisser celui-ci le long des rails. La longueur de la bande d'ombrage et la hauteur de la monture supportant les rails par rapport au pyranomètre sont déterminées par la position du Soleil au solstice d'été; la longueur de la bande est d'autant plus grande et l'inclinaison des rails d'autant plus faible que la latitude est élevée.

Divers auteurs, par exemple Drummond (1956), Dehne (1980) et Le Baron, Peterson et Dirmhirn (1980), ont proposé des formules pour le calcul des corrections à apporter aux mesures du rayonnement du ciel en vue de prendre en compte la partie de celui-ci que la bande empêche de mesurer. Pour un arceau dont le rapport est $b/r < 0,2$, le rayonnement, D_v , non mesuré pendant un jour peut se calculer par la relation :

$$D_v \approx \frac{b}{r} \cos^3 \delta \int_{t_{rise}}^{t_{set}} L(t) \cdot \sin h_\odot(t) dt$$

où δ est la déclinaison du Soleil, t est l'angle horaire du Soleil, t_{rise} et t_{set} sont les angles horaires au lever et au coucher du Soleil dans le cas d'un horizon mathématique (Φ étant la latitude du lieu, $t_{rise} = -t_{set}$ et $\cos t_{rise} = -\tan \Phi \cdot \tan \delta$), $L(t)$ est le rayonnement diurne du ciel et h_\odot est la hauteur du Soleil.

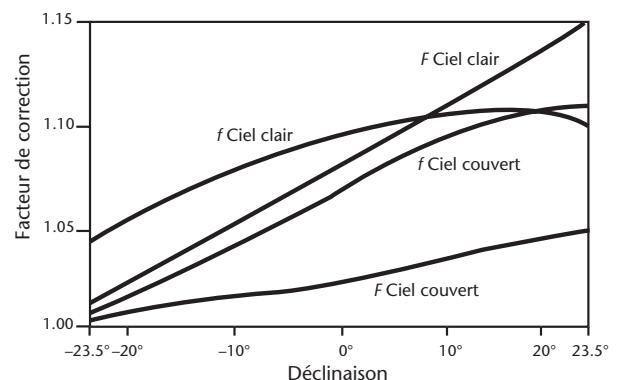
Au moyen de cette équation et compte tenu de certaines hypothèses sur la luminance énergétique du ciel, on peut déterminer un facteur de correction f de la manière suivante :

$$f = \frac{1}{1 - \frac{D_v}{D}}$$

D étant le rayonnement du ciel non occulté. La figure suivante donne un exemple des valeurs de ce facteur de correction dans le cas d'un ciel clair et d'un ciel complètement couvert, comparées à celles déduites de courbes empiriques. Il est évident que les écarts par rapport aux courbes théoriques dépendent de facteurs climatologiques propres à la station; ils doivent se déterminer expérimentalement par comparaison entre un instrument équipé d'un arceau d'ombrage et un autre instrument occulté par un disque à rotation automatique ?. En l'absence de données expérimentales, on peut utiliser les données calculées pour des conditions de ciel couvert en adoptant la valeur adéquate du rapport b/r :

$$\frac{D_v}{D}_{overcast} = \frac{b}{r} \cos^3 \delta (t_{set} - t_{rise}) \cdot \sin \Phi \cdot \sin \delta + \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot (\sin t_{set} - \sin t_{rise})$$

où δ est la déclinaison du Soleil, Φ est la latitude géographique et t_{rise} et t_{set} sont les angles horaires du Soleil au lever et au coucher (voir ci-dessus pour le calcul).



Comparaison entre les facteurs de correction calculés et expérimentaux pour un arceau d'ombrage de rapport $b/r = 0,169$, f indiquant les courbes calculées et F les courbes empiriques (d'après Dehne, 1980).

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Bass, A.M. et Paur, R.J., 1985 : The ultraviolet cross-sections of ozone: I. The Measurements. *Atmospheric Ozone* (publié sous la direction de C.S. Zerefos et A. Ghazi.), Reidel, Dordrecht, pp. 606 610.
- Bodhaine, B.A., Wood, N.B., Dutton, E.G. et Slusher, J.R., 1999 : On Rayleigh optical depth calculations. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 16, pp. 1854 1861.
- Commission électrotechnique internationale, 1987 : *Vocabulaire électrotechnique international*; Chapitre 845 ; Eclairage : CEI 60050 845.
- Commission internationale de l'éclairage, 1987 : *Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters*. CIE N° 69 1987.
- Commission internationale de l'éclairage, 1994 : *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*. CIE N° 108 1994.
- Dehne, K., 1980 : Vorschlag zur standardisierten Reduktion der Daten verschiedener nationaler Himmelsstrahlungs-Messnetze. *Annalen der Meteorologie* (Neue Folge), 16, pp. 57 59.
- Drummond, A.J., 1956 : On the measurement of sky radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Série B, 7, pp. 413 436.
- Forgan, B.W., 1996 : A new method for calibrating reference and field pyranometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13, pp. 638 645.
- Fröhlich, C. et Shaw, G.E., 1980 : New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*, Volume 19, Numéro 11, pp. 1773 1775.
- Frouin, R., Deschamps, P.-Y. et Lecomte, P., 1990 : Determination from space of atmospheric total water vapour amounts by differential absorption near 940 nm: Theory and airborne verification. *Journal of Applied Meteorology*, 29, pp. 448 460.
- Kerr, J.B. et McElroy, T.C., 1993 : Evidence for large upward trends of ultraviolet B radiation linked to ozone depletion. *Science*, 262, pp. 1032 1034.
- Kuhn, M., 1972 : Die spektrale Transparenz der antarktischen Atmosphäre. Teil I: Meßinstrumente und Rechenmethoden. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Série B, 20, pp. 207 248.
- Lal, M., 1972 : On the evaluation of atmospheric turbidity parameters from actinometric data. *Geofísica Internacional*, Volume 12, Numéro 2, pp. 1 11.
- Le Baron, B.A., Peterson, W.A. et Dirmhirn, I., 1980 : Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. *Solar Energy*, 25, pp. 1 13.
- Michalsky, J.J., 1988a : The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950 2050). *Solar Energy*, Volume 40, Numéro 3, pp. 227 235.
- Michalsky, J.J., 1988b : Errata. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950 2050). *Solar Energy*, Volume 41, Numéro 1.
- McKinlay A.F. et Diffey, B.L., 1987 : A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. Dans: (publié sous la direction de W.F. Passchier et B.F.M. Bosnjakovic), *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, Elsevier, Amsterdam, pp. 83 87.
- Organisation internationale de normalisation, 1990a : *Energie solaire — Spécification et classification des instruments de mesure du rayonnement solaire hémisphérique et direct*. ISO 9060.
- Organisation internationale de normalisation, 1990b : *Energie solaire — Etalonnage de pyrhéliomètres de terrain par comparaison à un pyrhéliomètre de référence*. ISO 9059.
- Organisation internationale de normalisation, 1990c : *Énergie solaire – Pyranomètres de champ –Pratique recommandée pour l'emploi*. ISO/TR 9901.
- Organisation internationale de normalisation, 1992 : *Énergie solaire – Étalonnage de pyranomètres de terrain par comparaison à un pyranomètre de référence*. ISO 9847.
- Organisation internationale de normalisation, 1993 : *Énergie solaire – Étalonnage d'un pyranomètre utilisant un pyrhéliomètre*. ISO 9846.
- Organisation internationale de normalisation, 1995 : *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1978 : *Manuel international des pratiques de mesure de la pollution atmosphérique de fond*. OMM N° 491, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1986a : *Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements*. Publication N° 7 de la série consacrée au Programme mondial de recherche sur le climat, OMM/TD N° 149, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1986b : *Recent Progress in Sunphotometry: Determination of the Aerosol Optical Depth*. Environmental Pollution Monitoring and Research Programme Report N° 43, OMM/TD N° 143, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993a : *Report of the WMO Workshop on the Measurement of Atmospheric Optical Depth and Turbidity* (Silver Spring,

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

Etats Unis d'Amérique, 6 10 décembre 1993). Rapport N° 101 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 659, Genève.

- Organisation météorologique mondiale, 1993b : *Rapport de la deuxième réunion des directeurs de projets de recherche sur l'ozone des Parties à la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone* (Genève, 10 12 mars 1993). Rapport N° 32 sur le projet mondial de recherche et de surveillance de l'ozone, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1996 : *WMO/UMAP Workshop on Broad band UV Radio meters* (Gar-misch-Partenkirchen, Allemagne, 22 23 avril 1996). Rapport N° 120 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 894, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998 : *Baseline Surface Radiation Network (BSRN): Operations Manual*. OMM/TD N° 879, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1999a : *Guidelines for Site Quality Control of UV Monitoring*. Rapport N° 126 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 884, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1999b : *Report of the LAP/COST/WMO Intercomparison of Erythemal Radiometers*. (Thessaloniki, Grèce, 13 23 septembre 1999). Rapport N° 141 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1051, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2001 : *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 1: Spectral instruments*. Rapport N° 125 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1066, Genève.

- Organisation météorologique mondiale, 2005 : *Réunion d'experts de la VAG sur l'établissement d'un réseau de surface pour l'observation permanente des propriétés optiques des aérosols sur la colonne atmosphérique* (Davos, Suisse, 8 10 mars 2004). Rapport N° 162 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1287, Genève.
- Parrish, J.A., Jaenicke, K.F. et Anderson, R.R., 1982 : Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin. *Photochemistry and Photobiology*, 36, pp. 187 191.
- Rüedi, I., 2001 : *International Pyrheliometer Comparison IPC IX, Results and Symposium*. MeteoSwiss Working Report N° 197, Davos et Zurich.
- Schneider, W., Moortgat, G.K., Tyndall, G.S. et Burrows, J.P., 1987 : Absorption cross-sections of NO₂ in the UV and visible region (200 700 nm) at 298 K. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, 40, pp. 195 217.
- United States Naval Observatory, 1993 : *The Astronomical Almanac*, Nautical Almanac Office, Washington DC.
- Vigroux, E., 1953 : Contribution à l'étude expérimentale de l'absorption de l'ozone. *Annales de Physique*, 8, pp. 709 762.
- Webb, A.R, Gardiner, B.G., Blumthaler, M. et Foster, P., 1994 : A laboratory investigation of two ultraviolet spectroradiometers. *Photochemistry and Photobiology*, Volume 60, N° 1, pp. 84 90.
- Young, A.T., 1981 : On the Rayleigh-scattering optical depth of the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, 20, pp. 328 330.

CHAPITRE 8

MESURE DE LA DURÉE D'INSOLATION

8.1 GÉNÉRALITÉS

Le terme «insolation» est associé à la luminosité du disque solaire par rapport au fond que constitue la lumière diffuse du ciel, ou encore, ce qui est plus facile à observer pour l'œil humain, à l'apparition d'ombres que projettent les objets illuminés. Dans cette acception, il se réfère plus au rayonnement visible qu'à l'énergie rayonnée dans d'autres longueurs d'onde, bien que les deux soient inséparables. Dans la pratique cependant, la première définition de ce terme a été établie directement à partir des résultats que fournissait l'héliographe Campbell-Stokes (voir section 8.2.3). Cet instrument relativement simple décèle une insolation quand le rayonnement solaire qu'il capte et focalise par l'intermédiaire d'une lentille spéciale laisse des traces de brûlure sur une bande de papier cartonné thermosensible. L'héliographe Campbell-Stokes, introduit dans les stations météorologiques dès 1880, est encore en service dans de nombreux réseaux. Pendant longtemps, faute de règlements internationaux relatifs aux dimensions et à la qualité des pièces spéciales qui constituaient l'instrument, les diverses configurations fondées sur le même principe de fonctionnement ont fourni des valeurs différentes de la durée d'insolation.

En 1962, l'OMM, dans le but d'uniformiser les mesures à l'échelle mondiale, a recommandé l'utilisation d'un héliographe Campbell-Stokes de conception particulière, qui fut appelé «héliographe de référence provisoire (HRP)» (OMM-N° 116). L'application d'une définition relative au matériel devait entraîner une amélioration uniquement durant le temps nécessaire à l'établissement d'une définition physique précise qui permettrait la fabrication d'héliographes automatiques et dont l'échelle se rapprocherait autant que possible de celle représentée par l'héliographe de référence provisoire. À ce sujet, il fut vivement recommandé que soit adopté d'un commun accord un seuil d'éclairement énergétique solaire direct correspondant au seuil auquel les héliographes Campbell-Stokes commencent à enregistrer une insolation effective. Les études menées à différentes stations (Bider, 1958; Baumgartner, 1979) montrent que le seuil d'éclairement énergétique nécessaire pour que des traces de brûlure apparaissent sur la bande de papier cartonné de l'appareil se situait

entre 70 et 280 W m⁻². Mais de nouvelles études, en particulier celles menées en France à l'aide de l'héliographe de référence provisoire, établirent la valeur moyenne de 120 W m⁻² dont l'adoption fut finalement recommandée¹ en tant que valeur seuil de l'éclairement énergétique solaire direct déterminant le seuil d'insolation. Compte tenu de l'éventail des résultats des essais, il fut accepté d'appliquer cette valeur seuil dans les spécifications des instruments avec un degré d'incertitude de 20 %. Il fut aussi recommandé d'utiliser le pyrhéliomètre comme instrument de référence pour détecter le seuil d'éclairement énergétique. Pour qu'il soit possible d'affiner cette référence à l'avenir, il faudra parvenir à s'entendre sur l'angle d'ouverture de l'instrument (voir les sections 7.2 et 7.2.1.3, chapitre 7 de la Partie I).

8.1.1 Définition

En application de la publication OMM-N° 544², la durée d'insolation au cours d'une période donnée correspond à la somme des périodes au cours desquelles l'éclairement énergétique solaire direct est supérieur à 120 W m⁻².

8.1.2 Unités et échelles

La grandeur physique que constitue la durée d'insolation SD s'exprime évidemment en unités de temps, les plus utilisées étant la seconde (s) et l'heure (h). Pour les besoins de la climatologie, on utilise aussi des unités dérivées telles que le nombre d'heures par jour ou les heures d'insolation quotidienne, ainsi que des pourcentages tels que la durée d'insolation quotidienne relative où SD peut se rapporter à la durée d'insolation extraterrestre potentielle SD_0 ou à la durée d'insolation maximale potentielle SD_{max} . La période sur laquelle portent les mesures (jour, décade, mois, année, etc.) est un élément important qu'il convient d'indiquer.

8.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Les exigences quant aux performances sont données au chapitre 1, Partie I. Ainsi convient-il de mesurer la durée d'insolation avec une incertitude de $\pm 0,1$ h et une résolution de 0,1 h.

¹ Recommandation 10 (CIMO-VIII) adoptée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa huitième session (1981).

² Recommandation 16 (CIMO-X) adoptée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa dixième session (1989).

Les besoins dans le domaine de la météorologie s'appliquant aux héliographes sont essentiellement liés à la nébulosité telle qu'on la conçoit en climatologie (OMM/TD-N° 50), puisque les facteurs qui déterminent le risque d'incertitude quant à la durée d'insolation sont le nombre de passages par la valeur seuil du rayonnement solaire direct et la rapidité de la transition.

Pour un ciel sans nuage, les erreurs éventuelles (en fonction de la quantité de poussière), dues à un mauvais réglage du seuil ou à la sensibilité spectrale, ne portent que sur les valeurs horaires qui correspondent au lever ou au coucher du soleil.

En présence de nuages épars (Cumulus, Stratocumulus), la transition est rapide et l'éclairement énergétique des nuages mesuré par un pyrhéliomètre est en général inférieur à 80 W m^{-2} ; l'exactitude du réglage du seuil est donc moins importante. Mais l'angle d'ouverture de l'héliographe peut influer sur le résultat de la mesure quand des groupes de nuages lumineux se situent près du soleil.

Le maximum d'exactitude est requis lorsque des couches de nuages élevés (Cirrus, Altostratus) présentant de petites variations d'épaisseur optique atténuent l'éclairement énergétique solaire direct de telle façon que la valeur mesurée est proche de 120 W m^{-2} . L'angle d'ouverture et l'exactitude du réglage du seuil sont alors tous deux importants.

En ce qui concerne les héliographes, les caractéristiques requises varient en fonction du lieu et de la saison, selon les conditions prédominantes de nébulosité que l'on peut décrire sommairement en utilisant trois gammes de la durée d'insolation journalière relative SD/SD_0 (voir section 8.1.2), à savoir un ciel nuageux par ($0 \leq SD/SD_0 < 0,3$), des nuages épars par ($0,3 \leq SD/SD_0 < 0,7$) et du beau temps par ($0,7 \leq SD/SD_0 \leq 1,0$). Les résultats obtenus par ciel nuageux prédominant présentent en pourcentage la plus grande proportion d'écart par rapport à la référence.

8.1.3.1 Application des données sur la durée d'insolation

L'une des premières applications consistait à se servir des données sur la durée de l'insolation pour établir les caractéristiques climatiques de certains types d'emplacements, les stations climatiques notamment. On tenait compte dans ce cas de l'effet psychologique positif d'un ensoleillement important sur le bien-être. Des collectivités locales se servent encore de ce type de données pour promouvoir le tourisme.

La description du temps passé, sur un mois par exemple, contient d'ordinaire une série de données sur la durée d'insolation journalière.

En ce qui concerne les domaines d'application de ce type, on accepte en général une incertitude d'environ 10 % sur plusieurs décades.

8.1.3.2 Corrélations avec d'autres variables météorologiques

La corrélation la plus importante entre la durée d'insolation et le rayonnement solaire global est donnée par la formule dite d'Ångström:

$$G/G_0 = a + b \cdot (SD/SD_0) \quad (8.1)$$

où G/G_0 est l'indice dit de limpidité (qui se rapporte à l'exposition énergétique globale extraterrestre), SD/SD_0 est la durée d'insolation correspondante (qui se rapporte à la valeur de la durée d'insolation extraterrestre potentielle) et a et b sont des constantes qu'il faut établir chaque mois. On a pu observer, à partir des relevés des stations allemandes (Golchert, 1981), que pour les moyennes mensuelles du rayonnement solaire journalier obtenues de cette manière à partir des données des instruments Campbell-Stokes, l'incertitude était de 10 % en été et atteignait jusqu'à 30 % en hiver.

Selon la formule d'Ångström, la corrélation inverse entre la nébulosité et la durée d'insolation existe implicitement. Cette corrélation n'est pas vérifiée dans le cas de nuages hauts et fins et évidemment pas dans celui de champs de nuages qui n'obscurcissent pas le soleil, de sorte que l'intensité de la corrélation inverse est avant tout fonction de la grandeur de l'ensemble des données statistiques (Stanghellini, 1981; Angell, 1990). En améliorant l'exactitude des mesures de la durée d'insolation, on devrait pouvoir réduire la dispersion des résultats statistiques, sachant toutefois que même des données parfaites ne peuvent aboutir en statistique qu'à une estimation suffisante du paramètre étudié.

8.1.3.3 Besoins en enregistrements automatiques

Comme un nombre croissant d'emplacements disposent de l'électricité, le fait que l'héliographe Campbell-Stokes soit autonome perd de son importance. De plus, la nécessité de remplacer quotidiennement la bande thermosensible rend problématique l'emploi de cet héliographe dans les stations météorologiques automatiques et dans celles n'étant dotées que d'un personnel restreint. S'il convient de remplacer l'héliographe Campbell-Stokes par de nouvelles méthodes de mesure automatisées, c'est essentiellement aussi parce que celles-ci permettent d'économiser des évaluations visuelles et qu'elles fournissent des résultats plus précis stockés sur des supports de données qui offrent la possibilité d'un traitement direct des données sur ordinateur.

8.1.4 Méthodes de mesure

Voici un résumé rapide des principes et des types d'instruments utilisés pour mesurer la durée de l'insolation:

- a) **Principe pyrhéliométrique :** détection pyrhéliométrique du passage de l'éclairement énergétique solaire direct par le seuil de 120 W m^{-2} (en application de la recommandation 10 (CIMO-VIII)). Un totalisateur horaire déclenché par les passages par la valeur seuil fournit la durée de l'insolation.

Types d'instruments : pyrhéliomètres couplés à un circuit à seuil électronique ou informatisé et à un totalisateur horaire.

- b) **Principe pyranométrique :**

- Mesure pyranométrique de l'éclairement énergétique solaire global (G) et diffus (D) afin d'en déduire l'éclairement énergétique solaire direct et de détecter la valeur seuil recommandée par l'OMM ; le reste comme dans a).

Types d'instruments : systèmes radiométriques, comprenant deux pyranomètres raccordés et un élément pare-soleil, couplés à un circuit à seuil électronique ou informatisé et à un totalisateur horaire.

- Mesure pyranométrique de l'éclairement énergétique solaire global (G) afin d'en déduire une durée d'insolation approximative.

Types d'instruments : pyranomètre couplé à un circuit à seuil électronique ou informatisé, capable de fournir des moyennes sur dix minutes ainsi que les valeurs maximale et minimale de l'éclairement énergétique solaire global (G) au cours de ces dix minutes.

- c) **Principe des traces de brûlure de l'héliographe :** Effet de seuil obtenu par la focalisation du rayonnement solaire direct qui entraîne la carbonisation d'une bande de carton (effet thermique de l'énergie solaire absorbée). La longueur des traces de brûlure fournit la durée de l'insolation.

Types d'instruments : héliographes Campbell-Stokes, en particulier le HRP recommandé (voir section 8.2).

- d) **Principe du contraste :** détection de la différence entre les valeurs de l'insolation reçue par un certain nombre de capteurs placés dans différentes positions par rapport au soleil, une valeur donnée de la différence entre les signaux de sortie des capteurs correspondant à la valeur seuil recommandée par l'OMM (déterminée par comparaison avec des valeurs de référence de l'insolation) ; le reste comme dans b).

Types d'instruments : détecteurs à plusieurs capteurs conçus tout spécialement (pour la plupart

équipés de cellules photovoltaïques), couplés à un circuit à seuil électronique ou informatisé et à un totalisateur horaire.

- e) **Principe du balayage :** analyse des valeurs de l'éclairement énergétique reçu de petits secteurs du ciel balayés en continu, par rapport à l'équivalent de la valeur seuil recommandée par l'OMM (déterminée par comparaison avec des valeurs de référence de l'insolation).

Types d'instruments : détecteurs à simple capteur équipés d'un dispositif de balayage particulier (diaphragme ou miroir rotatif, par exemple) et couplés à un circuit à seuil électronique ou informatisé et à un totalisateur horaire.

Les méthodes de mesure de la durée d'insolation décrites dans les paragraphes qui suivent fournissent des exemples de mise en pratique des principes énoncés ci-dessus. Les instruments qui fonctionnent suivant ces principes, à l'exception de l'enregistreur de commutation Foster, ont participé à la Comparaison OMM d'instruments automatiques de mesure de la durée d'insolation qui s'est tenue en 1988-1989 à Hambourg et à la Comparaison de pyranomètres et d'enregistreurs électroniques de la durée d'insolation, organisée par le Conseil régional VI et qui s'est tenue en 1984 à Budapest (OMM/TD-N° 146).

La description de l'héliographe Campbell-Stokes qui figure dans la section 8.2.3 est relativement détaillée, car cet instrument est encore largement employé dans des réseaux nationaux et qu'il serait bon que les spécifications et les règles d'évaluation recommandées par l'OMM soient prises en compte. (Il y a lieu de noter cependant qu'il n'est plus recommandé d'employer cette méthode, puisqu'elle ne permet pas d'enregistrer « la durée des périodes durant lesquelles le soleil brille effectivement, tout au moins pas de façon assez uniforme³ »).

Il est également proposé une analyse historique des héliographes dans les ouvrages suivants : Coulson, 1975 ; Hameed et Pittalwala, 1989 ; Sonntag et Behrens, 1992.

8.2 INSTRUMENTS ET CAPTEURS

8.2.1 Méthode pyrhéliométrique

8.2.1.1 Généralités

Découlant directement de la définition de l'insolation donnée par l'OMM (voir section 8.1.1) et par

³ Voir la recommandation 10 (CIMO-VIII).

conséquent recommandée pour obtenir des valeurs de référence de la durée d'insolation, cette méthode nécessite un pyrhéliomètre étanche et un dispositif de poursuite du soleil fiable destiné à pointer automatiquement ou tout au moins semi-automatiquement le pyrhéliomètre vers le soleil. Il est possible de modifier la méthode en fonction du choix du pyrhéliomètre dont l'angle d'ouverture a une influence sur l'éclairement énergétique mesuré quand des nuages entourent le soleil.

Il est possible de contrôler le seuil d'ensoleillement par une comparaison continue du signal de sortie du pyrhéliomètre avec la tension équivalente au seuil $V_{th} = 120 \text{ W m}^{-2} \cdot R \mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^2$ que l'on peut calculer à partir de la sensibilité R du pyrhéliomètre. Le passage par le seuil est détecté quand la différence $\Delta V = V - V_{th}$ change de signe. Le totalisateur horaire couplé à l'appareil fonctionne quand $\Delta V > 0$.

8.2.1.2 Sources d'erreur

Comme il n'existe pas encore de convention relative à la définition de l'angle d'ouverture (voir sections 7.2 et 7.2.1.3, chapitre 7 de la Partie I), deux pyrhéliomètres ayant des angles d'ouverture différents risquent fort de fournir des résultats très différents, en particulier quand le soleil est entouré de nuages. Selon la classe des pyrhéliomètres utilisés, il faut aussi tenir compte d'autres erreurs types, à savoir l'effet d'inclinaison, la sensibilité à la température, la non-linéarité et le décalage du zéro. Des erreurs importantes sont aussi à signaler en cas d'alignement imprécis sur le soleil ou encore lorsque la fenêtre de l'appareil est couverte de gouttes de pluie ou de neige.

8.2.2 Méthode pyranométrique

8.2.2.1 Généralités

La méthode pyranométrique utilisée pour obtenir la durée d'insolation repose sur la relation fondamentale entre le rayonnement solaire direct ($/$), d'une part, et le rayonnement solaire global (G) et diffus (D), d'autre part:

$$/ \bullet \cos \zeta = G - D \quad (8.2)$$

où ζ est l'angle zénithal du soleil et $/ \bullet \cos \zeta$ la composante horizontale de $/$. Pour que cette équation se vérifie exactement, l'angle d'ouverture occulté du pyranomètre utilisé pour mesurer D doit être égal à l'angle d'ouverture du pyrhéliomètre (voir chapitre 7, Partie I). En outre les bandes spectrales et les constantes de temps des pyrhéliomètres et des pyranomètres doivent être si possible identiques.

Lorsque l'on ne dispose pas d'un pyrhéliomètre à poursuite automatique du soleil, mais plutôt des

mesures de G et D obtenues par ordinateur à partir de relevés pyranométriques, il est possible, compte tenu de l'équation (8.2), d'exprimer le critère établi par l'OMM en ce qui concerne l'insolation par la relation suivante:

$$(G-D)/\cos \zeta > 120 \text{ W m}^{-2} \quad (8.3)$$

applicable directement aux relevés.

Les modifications apportées à cette méthode suivant les stations intéressent avant tout :

- a) le choix des pyranomètres,
- b) l'élément pare-soleil utilisé (bande ou disque dans le cas d'un dispositif de poursuite automatique du soleil) et la géométrie de l'ombre portée (angle occulté),
- c) la correction des erreurs découlant de la bande pare-soleil.

Il y a lieu de signaler aussi une modification spéciale, à savoir le remplacement du critère exprimé par l'équation (8.3) par une formule statistique de paramétrisation (éliminant la nécessité de déterminer l'angle zénithal du soleil), qui s'applique aux systèmes d'acquisition de données relativement simples (Sonntag et Behrens, 1992).

La méthode pyranométrique faisant appel à un seul pyranomètre pour obtenir une estimation de la durée d'insolation repose sur les deux hypothèses suivantes quant à la relation entre l'éclairement énergétique et la nébulosité :

- a) Un calcul assez précis de l'éclairement énergétique global potentiel à la surface terrestre intégrant la valeur calculée de l'exposition énergétique extraterrestre (G_0) et tenant compte de l'atténuation due à la diffusion dans l'atmosphère. Le facteur d'atténuation est fonction de la hauteur angulaire du soleil h et du trouble atmosphérique T . Le rapport entre l'éclairement énergétique global mesuré et cette valeur calculée de l'éclairement énergétique global par ciel clair est un bon moyen de déterminer la présence de nuages ;
- b) Quand une différence nette apparaît entre les valeurs minimale et maximale de l'éclairement énergétique global mesuré durant l'intervalle de 10 minutes, cela suppose que les nuages ont temporairement obscurci le ciel. Par contre, si aucune différence n'apparaît, c'est que, durant ces 10 minutes, soit aucune insolation n'a été enregistrée soit le soleil a brillé sans interruption ($SD = 0$ ou $SD = 10 \text{ min}$).

Compte tenu de ces deux hypothèses, il est possible de se servir d'un algorithme (Slob et Monna, 1991) pour calculer la durée d'insolation quotidienne à

partir de la somme des résultats recueillis au cours des intervalles de mesure de 10 minutes. Selon cet algorithme, la durée d'insolation est déterminée pour une succession d'intervalles de 10 minutes ($SD_{10'} = f \cdot 10 \text{ min}$, où f est la fraction de l'intervalle pendant laquelle une insolation a été enregistrée, $0 \leq f \leq 1$). Le facteur d'atténuation est en grande partie fonction du trajet optique de la lumière du soleil à travers l'atmosphère. Ce trajet variant en fonction de la hauteur angulaire du soleil ($h = 90^\circ - z$), l'algorithme établit une différence entre trois groupes horaires. Le plus souvent $f = 0$ ou $f = 1$, mais le cas où $0 < f < 1$ requiert une attention particulière. L'algorithme en question figure en annexe. Un tel cumul journalier présente un degré d'incertitude d'environ 0,6 h.

8.2.2.2 Sources d'erreur

Compte tenu de l'équation (8.3), les erreurs de mesure de l'éclairement énergétique solaire global et diffus sont répercutées dans les calculs de l'éclairement énergétique solaire direct et se trouvent fortement amplifiées lorsque l'angle zénithal du soleil augmente. Il importe donc, afin de réduire le degré d'incertitude associé aux résultats, de veiller à l'exactitude des corrections apportées aux valeurs du rayonnement solaire diffus obtenues à l'aide d'instruments équipés d'une bande pare-soleil (Rapport N° 15 de la série des publications de l'OMM consacrées aux instruments et aux méthodes d'observation) ainsi qu'au choix d'un pyranomètre de bonne qualité.

8.2.3

Héliographe Campbell-Stokes (méthode des traces de brûlure)

L'héliographe Campbell-Stokes se compose essentiellement d'une sphère de verre fixée concentriquement à l'intérieur d'un support formant un arc de cercle; le diamètre de la sphère est tel que celle-ci focalise nettement les rayons solaires sur une bande de papier cartonné thermosensible glissé dans des rainures aménagées dans les parois latérales du support. La position du support se règle différemment selon que l'instrument est appelé à fonctionner aux latitudes polaires, tempérées ou tropicales. Pour que les données recueillies soient utiles, il faut que la sphère et le support soient tous deux usinés avec une grande exactitude et la monture conçue de façon qu'on puisse assujettir la sphère exactement au centre du support. Celui-ci comporte trois paires de rainures superposées destinées à accueillir chacune la bande de papier cartonné correspondant à la saison de l'année (une paire pour les deux équinoxes), papier dont la forme et la longueur sont adaptées à la géométrie optique du système. En raison du problème (évoqué précédemment) que pose l'obtention des traces de brûlure quand la nébulosité est variable, cet instrument, comme tout autre dont le fonctionnement repose sur le même principe, ne mesure pas la durée d'insolation véritable.

Le tableau ci-après résume les critères principaux auxquels un héliographe Campbell-Stokes et ses accessoires doivent satisfaire pour que l'instrument

Caractéristiques techniques de l'héliographe Campbell-Stokes (classe HRP)

<i>Sphère en verre</i>		<i>Support en arc de cercle</i>		<i>Bandes d'enregistrement (héliogrammes)</i>	
Forme :	Uniforme	Matière :	Bronze ou matériau de durabilité équivalente	Matière :	Papier cartonné de bonne qualité, peu sensible à l'humidité
Diamètre :	10 cm	Rayon :	73 mm	Largeur :	exacte à 0,3 mm près
Couleur :	très pâle ou incolore	Caractéristiques supplémentaires :	a) ligne centrale «du midi» gravée transversalement sur la surface intérieure b) dispositif de réglage du support par rapport à l'horizontale selon la latitude c) double base permettant le réglage d'horizontalité et d'orientation	Épaisseur :	$0,4 \pm 0,05$ mm
Indice de réfraction :	$1,52 \pm 0,02$			Action de l'humidité :	inférieure à 2% sur les dimensions
Distance focale :	75 mm pour la lumière de sodium D			Couleur :	foncée, homogène, aucune différence décelable à la lumière naturelle diffuse
				Graduations :	lignes horaires imprimées en noir

entre dans la classe HRP. Tout héliographe destiné à être utilisé en tant que HRP devrait être conforme aux spécifications détaillées publiées par le Service météorologique du Royaume-Uni. Les bandes de papier cartonné devraient être conformes aux spécifications détaillées publiées par Météo-France.

8.2.3.1 Réglages

Au moment de l'installation de l'héliographe, il est nécessaire de procéder aux réglages suivants :

- a) Niveler le socle ;
- b) Ajuster le support en arc de cercle de manière que la ligne centrale de la bande d'équinoxe soit dans le plan de l'équateur céleste (l'échelle de latitude imprimée sur le bloc à glissière facilite cette opération) ;
- c) S'assurer que le plan vertical passant par le centre de la sphère et la marque de midi sur le support sont dans le plan du méridien géographique (réglage nord-sud).

La meilleure façon de vérifier ce dernier réglage consiste à observer la tache de soleil projetée par la sphère à midi de l'heure solaire vraie: si l'instrument est orienté convenablement, elle doit tomber exactement sur la ligne de 12 heures du support ou de la bande.

8.2.3.2 Évaluation

Pour obtenir des résultats uniformes avec les héliographes Campbell-Stokes, il est particulièrement important de respecter à la lettre les instructions suivantes quand on dépouille les enregistrements des HRP. Il y a lieu de déterminer la durée totale de l'insolation journalière en portant, sur le bord d'une bande de papier cartonné analogue, des traits correspondant à la longueur de chaque trace de brûlure sur l'enregistrement, puis en mesurant, au dixième d'heure le plus proche, la longueur totale des espaces délimités par ces traits. La longueur des différentes traces de brûlure est évaluée de la manière suivante :

- a) Si la trace est bien nette, avec des extrémités arrondies, en retrancher des quantités égales aux demi-rayons de ses courbures à chaque extrémité; cela reviendra généralement à réduire d'environ 0,1 heure la longueur totale de la trace ;
- b) Si la trace est circulaire, en prendre le rayon comme longueur ; lorsque plusieurs traces circulaires apparaissent sur le relevé quotidien, il suffit habituellement de considérer que deux ou trois brûlures équivalent à 0,1 heure d'insolation, quatre, cinq et six à 0,2 heure, et ainsi de suite par tranches de 0,1 heure ;
- c) Si la trace n'est qu'une ligne étroite, ou même une simple décoloration, en prendre toute la longueur ;

- d) Si la trace est bien nette, mais que sa largeur se réduit par endroits d'un tiers au moins, retrancher 0,1 heure par étranglement, sans toutefois que la somme des soustractions excède la moitié de la longueur totale de la trace.

Pour déterminer les erreurs aléatoires et systématiques commises lors de l'évaluation des enregistrements et garantir l'objectivité des résultats de la comparaison, il est recommandé de faire effectuer successivement et indépendamment par au moins deux personnes expérimentées les évaluations relatives à chaque instrument comparé.

8.2.3.3 Versions spéciales

L'héliographe Campbell-Stokes n'enregistrant qu'une partie de l'insolation durant les mois d'été aux latitudes supérieures à environ 65°, certains services nationaux en exploitent des versions modifiées.

L'une des solutions possibles consiste à utiliser deux de ces instruments en les installant dos à dos, l'un de manière normale, l'autre face au nord.

Sous de nombreux climats, il peut se révéler nécessaire de chauffer le système afin d'éviter les dépôts de givre et de rosée. Des comparaisons effectuées sous des climats comme ceux de l'Europe septentrionale ont montré que la différence entre les quantités d'insolation enregistrées respectivement par des instruments chauffés et non chauffés atteignait à peu près 1 % de la moyenne mensuelle en été et de 5 à 10 % en hiver.

8.2.3.4 Sources d'erreur

Pour ce type d'héliographe, les erreurs sont principalement dues à l'influence de la température et de l'humidité sur la bande de papier cartonné ainsi qu'à l'effet de brûlure excessive, en particulier dans le cas de nuages épars (Ikeda, Aoshima et Miyake, 1986).

Aux latitudes moyennes et élevées, les valeurs relevées le matin sont souvent erronées en raison du givre ou de la rosée qui se dépose sur l'instrument.

8.2.4 Instruments de mesure par contraste

L'Héliographe différentiel de Foster est un dispositif optoélectronique qui a été mis en service dans le réseau des États-Unis d'Amérique dès 1953 (Foster et Foskett, 1953). Le système se compose de deux cellules photoélectriques au sélénium, l'une exposée, l'autre soustraite au rayonnement solaire direct par un élément pare-soleil. Les cellules sont connectées de manière qu'aucun signal ne soit en-

gendré en l'absence de tout rayonnement solaire direct. Lorsque l'éclairement énergétique solaire direct dépasse environ 85 W m^{-2} , l'héliographe est actionné (Hameed et Pittalwala, 1989). Il n'est besoin d'ajuster la position de la bande pare-soleil que quatre fois par an afin de l'adapter aux modifications saisonnières de la course apparente du soleil dans le ciel.

8.2.5 **Appareils de mesure et d'exploration par contraste**

8.2.5.1 Généralités

Un certain nombre de capteurs optoélectroniques différents, à savoir des appareils de mesure et d'exploration par contraste, ont fait partie de la Comparaison OMM d'instruments automatiques de mesure de la durée d'insolation qui s'est tenue au Centre radiométrique régional de l'AR VI, à Hambourg, de 1988 à 1989 (voir par exemple le Rapport N° 15 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation). Le compte rendu de cette comparaison contient des descriptions détaillées de tous les instruments et capteurs comparés.

8.2.5.2 Sources d'erreur

La répartition des nuages dans le ciel ou le rayonnement solaire réfléchi par les environs peut avoir une influence sur les mesures, en raison à la fois des différences de procédures pour évaluer le contraste et les angles d'ouverture relativement grands des cellules des systèmes utilisés. En règle générale, les cellules photovoltaïques au silicium qui ne sont pas équipées de filtres présentent une sensibilité maximale dans le proche infrarouge et donnent des résultats qui varient en fonction du spectre du rayonnement solaire direct.

Comme les angles relativement faibles de l'ouverture en forme de fente rectangulaire de ces appareils présentent des différences considérables par rapport à ceux des ouvertures circulaires du pyrhéliomètre de référence, la répartition des nuages autour du soleil peut entraîner des écarts par rapport aux valeurs de référence.

Compte tenu des angles d'ouverture relativement faibles de ces appareils, des imperfections de l'enveloppe de verre peuvent entraîner des incertitudes particulières. Il est possible que la sensibilité spectrale du capteur contribue aussi aux erreurs associées à l'angle de hauteur solaire. Un seul des héliographes disponibles actuellement dans le commerce, utilisant un capteur pyroélectrique, présente une réponse spectrale satisfaisante.

8.3

EXPOSITIONS DES HÉLIOPHÈRES

Les trois conditions fondamentales à respecter pour l'installation des héliophères sont les suivantes :

- a) L'instrument doit être fixé solidement à un socle rigide. Cela n'est pas nécessaire pour les capteurs SONI (Rapport N° 15 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation) conçus également pour fonctionner sur des bouées.
- b) L'instrument doit être exposé en un endroit d'où le soleil est visible sans interruption durant toute sa trajectoire, à partir de 3° au-dessus de l'horizon, à toutes les époques de l'année. Cette recommandation accepte des exceptions dans les cas suivants :
 - De petites antennes ou d'autres obstacles de faible largeur angulaire ($\leq 2^\circ$) sont tolérés s'il n'est pas possible de trouver un autre emplacement. Dans un tel cas, il convient de préciser dans un document approprié la position, la hauteur et la largeur angulaire de ces obstacles et d'évaluer, en fonction du calcul astronomique de la trajectoire apparente du soleil, la différence potentielle de la durée d'insolation pour les heures et les jours où il faut tenir compte de ces obstacles ;
 - Dans les régions montagneuses (dans les vallées notamment), les obstacles naturels interviennent en tant que facteurs dans le climat local et il y a lieu d'en donner une description précise dans un document approprié.
- c) Il ne doit pas y avoir dans le voisinage de l'instrument de surfaces qui risqueraient de réfléchir une quantité importante du rayonnement solaire direct vers le capteur. Les appareils de mesure par contraste, principalement, sont sensibles à ce type de rayonnement réfléchi. Afin d'éviter ces interférences, il est conseillé de ne pas utiliser de peinture blanche et d'ôter la neige qui se déposerait sur les surfaces proches de l'instrument ou encore de faire écran au rayonnement provenant de ces surfaces.

Il est fait mention plus haut du réglage de l'axe du capteur. Pour certains de ces capteurs, le fabricant recommande une certaine inclinaison en fonction de la saison.

8.4

SOURCES GÉNÉRALES D'ERREUR

L'OMM a fourni sous forme d'écarts par rapport à des valeurs de référence les incertitudes associées à la durée d'insolation mesurée par divers types d'instruments et selon diverses méthodes, et ce pour les

conditions météorologiques enregistrées à Hambourg (Allemagne) en 1988-1989.

Il existe aussi un doute concernant les valeurs de référence en raison de l'incertitude relative au facteur d'étalonnage du pyrhéliomètre de référence et aux dimensions de l'angle d'ouverture de cet instrument (influence du halo solaire). Pour des valeurs ponctuelles, il conviendrait aussi de tenir compte de la constante de temps.

Les sources générales d'incertitudes sont les suivantes :

- a) L'étalonnage de l'héliographe (réglage de l'équivalent du seuil d'éclairement énergétique (voir section 8.5)) ;
- b) Les variations types de la réponse de l'héliographe en fonction des conditions météorologiques (ex. : température, nébulosité, poussière) et de la position du soleil (ex. : erreurs d'orientation, spectre solaire) ;
- c) Le mauvais réglage et l'instabilité de parties importantes de l'instrument ;
- d) La simplification de l'évaluation des mesures ou les erreurs d'évaluation ;
- e) Les erreurs de procédures relatives à l'enregistrement de la durée ;
- f) La poussière et l'humidité qui se déposent sur les surfaces optiques et sensibles ;
- g) L'insuffisance de l'entretien.

8.5 ÉTALONNAGE

Avant d'aborder la description des diverses méthodes d'étalonnage, il semble utile d'énoncer quelques remarques générales :

- a) Il n'existe aucune norme relative à la méthode d'étalonnage des héliographes ;
- b) Dans le cas d'un étalonnage à l'extérieur, il convient d'employer la méthode pyrhéliométrique pour obtenir des valeurs de référence ;
- c) Compte tenu des différences techniques entre les divers héliographes et l'instrument de référence, ainsi que de la variabilité naturelle des conditions de mesure, l'étalonnage doit se fonder sur de longues comparaisons (quelques mois) ;
- d) L'étalonnage des héliographes nécessite en général que soit adopté un mode opératoire particulier pour régler les valeurs de seuil (moyens électroniques pour les dispositifs optoélectriques, logiciel pour les systèmes pyranométriques) ;
- e) Pour les appareils optoélectriques donnant un signal de sortie analogique, la durée de l'étalonnage est relativement courte ;

- f) L'étalonnage en laboratoire (à l'aide d'une lampe) est recommandé essentiellement pour vérifier périodiquement la stabilité des instruments utilisés sur le terrain.

8.5.1 Méthodes d'étalonnage sur le terrain

8.5.1.1 Comparaison des données de la durée d'insolation

Il y a lieu de mesurer simultanément les valeurs de référence SD_{ref} et les valeurs d'étalonnage SD_{cal} de l'instrument à étalonner. Il convient d'utiliser comme instrument de référence un pyrhéliomètre fixé sur une monture de poursuite automatique du soleil et associé à un circuit à seuil informatisé (voir section 8.1.4). Il est également possible d'utiliser un héliographe étalonné régulièrement et dont l'exactitude est connue. Sachant que les exigences quant à l'exactitude du seuil d'insolation d'un héliographe varient en fonction des conditions météorologiques rencontrées (voir section 8.1.3), les résultats des comparaisons doivent être obtenus par calcul statistique à partir de jeux de données recueillis sur de longues périodes.

Si l'on applique la méthode à l'ensemble d'un jeu de données recueilli sur une certaine période (comportant des conditions types de nébulosité), le premier résultat de l'étalonnage calculé est le rapport :

$$q_{tot} = \Sigma_{tot} SD_{ref} / \Sigma_{tot} SD_{cal}$$

Lorsque la valeur q est supérieure ou inférieure à 1, il faut régler la tension équivalente au seuil afin de rétablir $q = 1$. Comme il n'existe pas de corrélation étroite entre le réglage requis et q_{tot} , il est nécessaire de poursuivre la comparaison sur plusieurs périodes successives afin de parvenir par approximation itérative à un seuil idéal $q_{tot} = 1$. La durée totale d'une comparaison peut atteindre entre trois et six mois dans les régions de l'Europe situées aux latitudes moyennes. Il est par conséquent intéressant de prévoir des installations qui permettent d'étalonner simultanément plusieurs héliographes d'un réseau. (Il faut signaler que l'emploi de q_{tot} comme facteur de correction de la somme des valeurs de la durée d'insolation ne donne des résultats fiables que si les périodes sur lesquelles doit porter l'évaluation se caractérisent par les mêmes conditions de nébulosité que la période d'étalonnage. Il n'est donc pas recommandé de recourir à cette méthode.)

Lorsqu'on applique la méthode à des jeux de données sélectionnés en fonction de conditions de mesure particulières (nébulosité, hauteur angulaire du soleil, durée d'insolation relative, heure du jour,

etc.), il est possible de calculer par exemple, par des méthodes statistiques, des facteurs $q_{sel} = \Sigma_{sel} SD_{ref}/\Sigma_{sel} SD_{cal}$ pour différents types de nébulosité. Ces facteurs peuvent être utilisés pour corriger des jeux de données relevés dans des conditions de nébulosité également bien précisées.

Il est par contre recommandé d'ajuster la tension équivalente au seuil, en particulier si l'on examine les valeurs de q_{sel} qui correspondent aux conditions de nébulosité les plus difficiles (Cirrus, Altostratus). Il est également nécessaire de valider cet ajustement par itération; suivant le type de conditions météorologiques, la comparaison peut durer quelques semaines, voire quelques mois.

8.5.1.2 Comparaison de signaux analogiques

Cette méthode s'applique uniquement aux capteurs de la durée de l'insolation à sortie analogique qui présentent une réaction linéaire à l'éclairement énergétique solaire direct, du moins pour les valeurs inférieures à 500 W m^{-2} . Il convient de procéder à la comparaison entre l'éclairement énergétique mesuré simultanément par un pyrhéliomètre de référence et par un capteur à sortie analogique au cours de périodes sans nuages ou à d'autres intervalles de temps au cours desquels l'éclairement énergétique solaire direct peut varier lentement sans toutefois atteindre 500 W m^{-2} .

En appliquant une régression linéaire au jeu de données ainsi constitué, on obtient une ligne d'ajustement optimal de laquelle on peut déduire la tension équivalente au seuil de 120 W m^{-2} . En cas d'écart supérieur à 20 % entre le résultat de l'étalonnage et la tension certifiée, il convient d'ajuster le seuil du capteur.

Quant aux capteurs caractérisés par une grande sensibilité spectrale, il y a lieu d'éliminer les données qui correspondent à une faible hauteur angulaire du soleil, proches du seuil de 120 W m^{-2} , en raison de leur manque flagrant de linéarité dû à cette sensibilité, à moins évidemment que la tension équivalente au seuil, au lever et au coucher du soleil, présente un intérêt particulier. Il faut extrapoler la tension équivalente au seuil de valeurs plus élevées de l'éclairement énergétique.

8.5.1.3 Méthode du MEIT

La méthode dite du MEIT (mean effective irradiance threshold) est fondée sur la détermination d'un seuil moyen horaire de l'éclairement énergétique effectif I_m .

Dans un premier temps, il faut procéder à une série de mesures par pyrhéliomètre assisté par ordinateur, pour des seuils fictifs successifs de l'éclairement

énergétique $I(n)$ (entre 60 et 240 W m^{-2} , par exemple) (cela signifie que $I(n) = (60 + n) \text{ W m}^{-2}$ avec $n = 0, 1, 2, \dots, 180$), afin d'obtenir une série de valeurs horaires de la durée d'insolation $SD_{ref}(h_k, I(n))$.

Dans un deuxième temps, il faut comparer la valeur horaire de la durée d'insolation $SD(h_k)$ fournie par le capteur à $SD_{ref}(h_k, I(n))$, pour trouver le $n = n_k$ pour lequel $SD(h_k) = SD_{ref}(h_k, I(n_k))$. $I(n_k)$ représente la valeur du MEIT pour l'heure h_k : $I_m(h_k) = (60 + n_k) \text{ W m}^{-2}$, dans le cas contraire, il faut obtenir la valeur du MEIT par interpolation à partir des valeurs adjacentes.

Dans un troisième temps enfin, on ajuste la tension équivalente au seuil si l'écart relatif entre une valeur moyenne du MEIT I_m et le seuil idéal de 120 W m^{-2} est supérieur à 20 %. Il y a lieu de prendre une valeur mensuelle par exemple comme valeur moyenne, en raison de la grande dispersion des écarts des valeurs horaires.

Cette méthode ne peut s'appliquer aux heures marquées par des passages rapides par le seuil; le taux moyen horaire de variation devrait être inférieur à $5 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Enfin, les valeurs du MEIT ne sont pas représentatives de l'ensemble du jeu de données recueilli au cours de la période d'étalonnage.

8.5.2 Méthode d'étalonnage en laboratoire

Étant donné qu'il est difficile de simuler en laboratoire la distribution du rayonnement solaire global et diffus, il ne peut être recommandé qu'un étalonnage provisoire applicable aux héliographes dont la tension équivalant au seuil est réglable. Il faut pour ce faire disposer du matériel suivant: une source de rayonnement stabilisée (de préférence reproduisant autant que possible le spectre solaire) ainsi qu'un socle qui recevra l'héliographe à étalonner et permettra de l'ajuster avec exactitude et recevra aussi un héliographe bien étalonné sur le terrain, que l'on utilisera comme référence. Les deux instruments doivent être du même modèle.

Le processus consiste à installer tout d'abord et avec soin l'instrument de référence dans le faisceau de la lampe de façon qu'une sortie analogique indique 120 W m^{-2} ou que la commutation habituelle indique ce seuil. On remplace ensuite l'instrument de référence précisément par celui à étalonner et dont il faudra ajuster la tension de seuil afin que la commutation se fasse ou encore pour obtenir l'équivalent de 120 W m^{-2} . Il faut ensuite répéter ce processus plusieurs fois pour s'assurer de la répétabilité des résultats.

8.6**ENTRETIEN**

Les programmes d'entretien qui relèvent de la responsabilité des techniciens comprennent les éléments suivants :

- a) Nettoyage : Il est nécessaire de nettoyer chaque jour les fenêtres d'ouverture de chacun des instruments, en particulier celles des appareils d'exploration dont l'angle d'ouverture est faible. Les instruments qui ne sont pas équipés d'une protection contre le givre et la rosée exigent l'attention d'un technicien à plusieurs reprises certains jours.
- b) Vérifications : Il faudrait s'assurer chaque jour de la bonne rotation de parties spéciales (d'exploration) des instruments et vérifier les valeur de contrôle du système d'acquisition des données.

- c) Remplacements : Dans le cas des héliographes Campbell-Stokes, il faut remplacer la bande de papier cartonné quotidiennement ; dans celui d'autres instruments, il faut remplacer le support de stockage de données régulièrement.
- d) Réglages : Il faut procéder aux réglages recommandés par le fabricant pour les instruments dont il faut changer l'inclinaison en fonction de la saison; cela peut aussi être le cas après un orage violent.

Certaines pièces des instruments et des systèmes d'acquisition des données nécessitent un entretien particulier, indiqué dans les manuels d'instructions, qui devra être exécuté par des techniciens qualifiés.

ANNEXE

ALGORITHME PERMETTANT DE DÉTERMINER LA DURÉE D'INSOLATION À PARTIR DE MESURES DE L'ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE GLOBAL DIRECT

(Slob et Monna, 1991)

L'estimation de la durée d'insolation SD quotidienne est fondée sur la somme des fractions f d'intervalle de 10 minutes, soit, $SD = \sum SD_{10}$, où $SD_{10} = f \leq 10 \text{ min}$. Dans la pratique, $f = 0$ (ensoleillement nul, ciel couvert) ou 1 (ensoleillement uniquement, ciel clair), mais une attention particulière est accordée au cas où $0 < f < 1$ (ensoleillement partiel, nébulosité partielle). Étant donné que la corrélation entre la durée d'insolation et l'exposition énergétique globale, mesurée sur une surface horizontale, varie suivant la hauteur angulaire du soleil (h), une différence est établie tout d'abord en fonction de $\sin(h)$.

Les variables suivantes sont prises en compte :

- h Hauteur angulaire du soleil en degrés
- G Éclairement énergétique global reçu sur une surface horizontale en W m^{-2}
- I Éclairement énergétique direct reçu sur une surface perpendiculaire à la direction du soleil en W m^{-2}

D Rayonnement solaire diffus reçu sur une surface horizontale en W m^{-2}

T_L Facteur de trouble de Linke (sans dimension)

Pour les valeurs mesurées de G ,

G représente la moyenne sur 10 minutes de l'éclairement énergétique global mesuré

G_{min} représente la valeur minimale de l'éclairement énergétique global mesuré au cours de l'intervalle de 10 minutes

G_{max} représente la valeur maximale de l'éclairement énergétique global mesuré au cours de l'intervalle de 10 minutes ($G_{min} \leq G \leq G_{max}$)

Les équations utilisées sont:

$G_0 = I_0 \sin(h)$, $I_0 = 1\,367 \text{ W m}^{-2}$ (pour l'éclairement énergétique extraterrestre)

$I = I_0 \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))$, $I_0 = 1\,367 \text{ W m}^{-2}$

$c = (G - D)/(I \sin(h))$, où

$T_L = 4$ et

$D = 1,2 G_{min}$ si $(1,2 G_{min} < 0,4)$ ou alors $D = 0,4$

<i>Hauteur angulaire du soleil</i>	$\sin(h) < 0,1$, $h < 5,7^\circ$	$0,1 \leq \sin(h) \leq 0,3$, $5,7^\circ \leq h \leq 17,5^\circ$	$\sin(h) \geq 0,3$, $h \geq 17,5^\circ$				
	Aucun autre critère de décision	$G/G_0 \leq \{0,2 + \sin(h)/3 + \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ avec $T_L = 6$?	$G_{max}/G_0 < 0,4$?				
<i>Autres critères</i>			Si «oui»	Si «non»			
					$G_{min}/G_0 > \{0,3 + \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ avec $T_L = 10$?		
			Si «oui»	Si «non»			
					$G_{max}/G_0 > \{0,3 + \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ et $G_{max} - G_{min} < 0,1 G_0$ avec $T_L = 10$?		
			Si «oui»	Si «non»			
					$c < 0$	$0 \leq c \leq 1$	$c > 1$
<i>Résultat</i>	$f = 0$	$f = 0$	$f = 1$	$f = 0$	$f = 1$	$f = 1$	$f = 0$
					$f = c$	$f = 1$	

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Angell, J.K., 1990 : Variation in United States cloudiness and sunshine duration between 1950 and the drought year of 1988. *Journal of Climate*, 3, pp. 296 à 308.
- Baumgartner, T., 1979 : Die Schwellenintensität des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes an wolkenlosen Tagen. *Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, Numéro 84, Zurich.
- Bider, M., 1958 : Über die Genauigkeit der Registrierungen des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Série B, Volume 9, Numéro 2, pp. 199 à 230.
- Coulson, K.L., 1975 : *Solar and Terrestrial Radiation. Methods and Measurements*. Academic Press, New York, pp. 215–233.
- Foster, N.B. et L.W. Foskett, 1953 : A photoelectric sunshine recorder. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34, pp. 212 à 215.
- Golchert, H.J., 1981 : Mittlere Monatliche Globalstrahlungsverteilungen in der Bundesrepublik Deutschland. *Meteorologische Rundschau*, 34, pp. 143 à 151.
- Hameed, S. et I. Pittalwala, 1989 : An investigation of the instrumental effects on the historical sunshine record of the United States. *Journal of Climate*, 2, pp. 101 à 104.
- Ikeda, K., T. Aoshima et Y. Miyake, 1986 : Development of a new sunshine-duration meter. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Volume 64, Numéro 6, pp. 987 à 993.
- Jaenicke, R. et F. Kasten, 1978 : Estimation of atmospheric turbidity from the burned traces of the Campbell-Stokes sunshine recorder. *Applied Optics*, 17, pp. 2617 à 2621.
- Organisation météorologique mondiale, 1962 : *Commission des instruments et des méthodes d'observation. Rapport final abrégé de la troisième session*. OMM-N° 116, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1982 : *Commission des instruments et des méthodes d'observation. Rapport final abrégé de la huitième session*. OMM-N° 590, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1984a : Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a new correction formula (K. Dehne). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les observa-*
- tions météorologiques présentant un bon rapport coût-efficacité (TECEMO). Rapport N° 15 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, Genève, pp. 263 à 267.
- Organisation météorologique mondiale, 1984b : A new sunshine duration sensor (P. Lindner). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les observations météorologiques présentant un bon rapport coût-efficacité (TECEMO)*. Rapport N° 15 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, Genève, pp. 179 à 183.
- Organisation météorologique mondiale, 1985 : Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration (K. Dehne). *Communications présentées à la troisième Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECIMO III)*. Rapport N° 22 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 50, Genève, pp. 263 à 271.
- Organisation météorologique mondiale, 1986 : *Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI* (G. Major). Rapport N° 16 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 146, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990 : *Commission des instruments et des méthodes d'observation. Rapport final abrégé de la dixième session*. OMM-N° 727, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel du Système mondial d'observation*. OMM-N° 544, Genève.
- Painter, H.E., 1981 : The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of normal incidence irradiance. *The Meteorological Magazine*, 110, pp. 102 à 109.
- Slob, W.H. et W.A.A. Monna, 1991 : *Bepaling van een directe en diffuse straling en van zonneschijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling*. KNMI TR136, de Bilt.
- Sonntag, D. et K. Behrens, 1992 : Ermittlung der Sonnenscheindauer aus pyranometrisch gemessenen Bestrahlungsstärken der Global- und Himmelstrahlung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Numéro 181.
- Stanghellini, C., 1981 : A simple method for evaluating sunshine duration by cloudiness observations. *Journal of Applied Meteorology*, 20, pp. 320 à 323.

CHAPITRE 9

MESURE DE LA VISIBILITÉ

9.1 GÉNÉRALITÉS

9.1.1 Définition

La visibilité a été définie pour la première fois, pour les besoins de la météorologie, comme une quantité devant être estimée par un observateur humain, et c'est ainsi que sont réalisées la majorité des observations. Toutefois, l'estimation de la visibilité est influencée par de nombreux éléments subjectifs et physiques. La quantité météorologique fondamentale, à savoir la transparence de l'atmosphère, peut être mesurée de manière objective et être représentée par la Portée Optique Météorologique (POM).

La Portée Optique Météorologique est la longueur du trajet que doit effectuer dans l'atmosphère un faisceau de rayons lumineux parallèles, émanant d'une lampe à incandescence, à une température de couleur de 2 700 K, pour que l'intensité du flux lumineux soit réduite à 0,05 fois sa valeur originale, le flux lumineux étant évalué au moyen de la fonction de luminosité photométrique de la Commission internationale de l'éclairage (CIE).

La visibilité, la visibilité météorologique de jour et la visibilité météorologique de nuit¹ sont définies comme la plus grande distance à laquelle un objet noir, de dimensions appropriées, situé au sol, peut être vu et identifié de jour sur le fond du ciel à l'horizon ou, quand il s'agit d'observations de nuit, pourrait être vu et identifié si l'éclairement général augmentait jusqu'à atteindre l'intensité normale en lumière du jour (OMM, 1992a; 2003).

Portée visuelle (en météorologie) : distance à laquelle le contraste entre un objet donné et son arrière-plan atteint la valeur du seuil de contraste propre à l'observateur (OMM, 1992a).

La lumière de l'air est la lumière du soleil et du ciel diffusée vers les yeux d'un observateur par les particules en suspension dans l'air (et, dans une faible mesure, par les molécules d'air) situées dans le cône de vision de l'observateur. En fait, la lumière de l'air atteint l'œil de la même manière que le rayonnement diffus du ciel atteint la surface de la Terre. La lumière de l'air est le facteur fondamental limitant la visibilité horizontale diurne pour les objets noirs car ses effets opérant dans le cône de vision entre l'homme et l'objet, portent la luminance apparente d'un objet noir suffisamment éloigné à un niveau qui ne peut être distingué de celui du ciel de fond. La plus grande partie de la lumière de l'air pénétrant dans l'œil de l'observateur provient des zones de son cône de vision assez proches de lui.

Les quatre qualités photométriques suivantes sont définies en détails dans plusieurs normes, telles celles établies par la Commission électrotechnique internationale (CEI, 1987) :

- a) *le flux lumineux* (symbole : F (ou Φ) ; unité : lumen, lm) est une grandeur dérivée d'un flux énergétique en évaluant le rayonnement en fonction de son action sur l'observateur photométrique standard de la CIE;
- (b) *l'intensité lumineuse* (symbole : I ; unité : candela, cd ou lm sr^{-1}) est le flux lumineux par unité d'angle solide;
- (c) *la luminance* (symbole : L ; unité : cd m^{-2}) est l'intensité lumineuse par unité d'aire;
- (d) *l'éclairement (lumineux)* (symbole : E ; unité : lux ou lm m^{-2}) est le flux lumineux par unité d'aire.

Le coefficient d'extinction (symbole σ) est la proportion de flux lumineux qu'un faisceau de rayons lumineux parallèles, émanant d'une source incandescente, à une température de couleur de 2 700 K, perd en parcourant dans l'atmosphère une longueur égale à l'unité de distance. Ce coefficient mesure l'atténuation due à la fois à l'absorption et à la diffusion.

Le contraste de luminance (symbole C) est le rapport de la différence entre la luminance d'un objet et celle de son arrière-plan à la luminance de cet arrière-plan.

Le seuil de contraste (symbole ϵ) est la valeur minimale du contraste de luminance que peut détecter l'œil humain; c'est-à-dire la valeur qui permet de

¹ Afin d'éviter toute confusion, il convient de ne pas définir la visibilité de nuit comme «la plus grande distance à laquelle des sources lumineuses d'intensité modérée connue, se détachant d'un arrière plan non éclairé, peuvent être vues et identifiées» (voir le *Rapport final abrégé de la Onzième session de la Commission des Instruments et des Méthodes d'Observation* (OMM-N° 807)). Si la visibilité doit être évaluée à partir de sources lumineuses, il est recommandé de définir la portée visuelle en indiquant précisément l'intensité lumineuse et son application, comme par exemple, la portée visuelle de piste. La Commission a toutefois estimé que de nouvelles recherches seraient nécessaires pour résoudre les problèmes pratiques d'application de cette définition.

distinguer un objet du fond sur lequel il se détache. Le seuil de contraste varie selon l'observateur.

Le seuil d'éclairement (E_t), est la valeur minimale d'éclairement de l'œil humain pour la détection de sources ponctuelles de lumière sur un arrière-plan de luminance donné. La valeur d' E_t varie donc en fonction des conditions.

Le facteur de transmission (symbole T) est défini, pour un faisceau de rayons lumineux parallèles, émanant d'une source incandescente, à une température de couleur de 2 700 K, comme la fraction de flux lumineux qui subsiste dans le faisceau à l'issue d'une trajectoire optique de longueur donnée dans l'atmosphère. Le facteur de transmission est également appelé coefficient de transmission. On utilise aussi les termes transmittance ou pouvoir transmissif de l'atmosphère lorsque le trajet est défini, c'est-à-dire de longueur bien déterminée (par exemple dans le cas d'un transmissomètre). Dans ce cas, T est souvent multiplié par 100 et exprimé en pourcentage.

9.1.2 Unités et échelles

La visibilité météorologique ou Portée Optique Météorologique (POM) s'exprime en mètres ou en kilomètres. Sa gamme de mesure varie en fonction des applications. Si, pour les besoins de la météorologie synoptique, l'échelle des valeurs mesurées de la POM s'étend de moins de 100 mètres à plus de 70 km, la gamme des mesures pourra être plus restreinte pour d'autres applications. C'est notamment le cas pour l'aviation civile pour laquelle la limite supérieure peut être de 10 km. Cette gamme peut être réduite plus encore lorsqu'il s'agit de mesurer la portée visuelle de piste représentant les conditions d'atterrissement et de décollage par visibilité réduite. La portée visuelle de piste n'est requise qu'entre 50 m et 1 500 m (voir chapitre 2, Partie II). Pour d'autres applications, telles que la circulation routière ou le trafic maritime, les limites peuvent être différentes selon les besoins et les lieux où sont effectuées les mesures.

Les erreurs dans les mesures de la visibilité augmentent proportionnellement avec la visibilité et les échelles de mesure tiennent compte de cet élément. Ce fait est reflété dans le code utilisé pour les comptes rendus synoptiques à travers l'utilisation de trois segments linéaires d'une résolution décroissante, c'est-à-dire de 100 à 5 000 m par pas de 100 m, de 6 à 30 km par pas de 1 km et de 35 à 70 km par pas de 5 km. Cette échelle permet de rendre compte de la visibilité avec une résolution supérieure à l'exactitude de la mesure, excepté lorsque la visibilité est inférieure à 1 000 m environ.

9.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Le concept de visibilité est largement utilisé en météorologie sous deux aspects différents. La visibilité est d'abord l'un des éléments qui identifient les caractéristiques d'une masse d'air, spécialement aux fins de la météorologie synoptique et de la climatologie. Elle doit être pour cela représentative de l'état optique de l'atmosphère. C'est ensuite un paramètre opérationnel correspondant à des critères spécifiques ou à des applications spéciales. À cet effet, elle s'exprime alors directement en termes de distance à laquelle il est possible de voir des repères ou des lumières donnés.

L'une des applications spéciales essentielles est celle des services météorologiques pour l'aviation (voir le chapitre 2 de la Partie II).

La mesure de la visibilité utilisée en météorologie devrait être libre de l'influence des conditions extra météorologiques et être simplement reliée à des concepts intuitifs de visibilité et à la distance à laquelle les objets courants peuvent être vus dans des conditions normales. La POM a été définie afin de répondre à ces besoins, en s'adaptant aux méthodes instrumentales de mesure de jour et de nuit et en tenant dûment compte des relations avec d'autres mesures de la visibilité. La POM a été officiellement adoptée par l'OMM comme la mesure de la visibilité à usage général et aéronautique (OMM-1990a). Elle est également reconnue par la Commission électrotechnique internationale (CEI, 1987) pour les applications en optique atmosphérique et pour la signalisation visuelle.

La POM est liée au concept intuitif de visibilité au travers du seuil de contraste. En 1924, Koschmieder, suivi par Helmholtz, proposa une valeur de 0,02 pour ϵ . D'autres auteurs proposèrent d'autres valeurs. Elles varient de 0,0077 à 0,06 voire 0,2. Dans des conditions atmosphériques données, la valeur la plus faible donne une estimation plus forte de la visibilité. Pour les besoins de l'aéronautique, il est admis que ϵ est supérieur à 0,02, et on prend une valeur de 0,05 étant donné que, pour un pilote, le contraste d'un objet (marques de piste) par rapport au terrain avoisinant est très inférieur à celui d'un objet contre l'horizon. On suppose que lorsqu'un observateur peut juste voir et reconnaître un objet noir sur l'horizon, le contraste apparent de l'objet est de 0,05 et, comme cela est expliqué ci-après, cela conduit à adopter 0,05 comme facteur de transmission dans la définition de la POM.

Les exigences d'exactitude sont abordées dans le chapitre 1 de la Partie I du présent Guide.

9.1.4 Méthodes de mesure

La visibilité est un phénomène psychophysique complexe, déterminé principalement par le coefficient d'extinction atmosphérique associé aux particules solides et liquides en suspension dans l'atmosphère. L'extinction est essentiellement causée par la diffusion plutôt que par l'absorption de la lumière. L'estimation de la visibilité est sujette à des variations de la capacité de perception et d'interprétation des observateurs ainsi que des caractéristiques des sources lumineuses et du facteur de transmission. De ce fait, toute estimation visuelle de la visibilité est subjective.

Les observations humaines de la visibilité dépendent non seulement des caractéristiques photométriques et dimensionnelles de l'objet qui est ou devrait être perçu mais aussi du seuil de contraste propre à l'observateur. La nuit, elle dépend de l'intensité des sources lumineuses, de l'éclairement de l'arrière-plan et, si l'estimation est faite par un observateur, de l'accommodation permettant à l'œil de l'observateur de s'adapter à l'obscurité et du seuil d'éclairement propre à l'observateur. L'estimation de la visibilité nocturne est particulièrement problématique. La première définition de la visibilité de nuit figurant à la section 9.1.1 est donnée en termes de visibilité diurne équivalente afin de s'assurer qu'aucune modification artificielle n'intervient dans l'estimation de la visibilité à l'aube et au crépuscule. La deuxième définition a des applications pratiques, notamment pour les besoins de l'aéronautique, mais elle n'est pas la même que la première et donne généralement des résultats différents.

Les méthodes instrumentales permettent de mesurer le coefficient d'extinction, à partir duquel la POM peut être calculée. On peut ensuite calculer la visibilité à partir des valeurs connues des seuils de contraste et d'éclairement, ou en attribuant à ces éléments des valeurs convenues. Sheppard (1983) signale que:

«pour s'en tenir strictement à la définition (de la POM), il faudrait monter un projecteur et un récepteur dotés de caractéristiques spectrales appropriées sur deux plates-formes pouvant être séparées, par exemple le long d'une voie ferrée, jusqu'à ce que le facteur de transmission soit de 5%. Toute autre approche ne donne qu'une estimation de la POM.»

Toutefois, on utilise des instruments fixes en partant de l'hypothèse selon laquelle le coefficient d'extinction est indépendant de la distance. Certains instruments mesurent directement l'atténuation et d'autres mesurent la diffusion de la lumière pour

déduire le coefficient d'extinction. Ces instruments sont décrits dans la section 9.3. La brève analyse de la physique de la visibilité présentée dans ce chapitre peut être utile pour comprendre les relations entre les différentes mesures du coefficient d'extinction et pour étudier les instruments utilisés pour le mesurer.

Perception visuelle - vision photopique et scotopique :

Les conditions de perception visuelle sont basées sur les mesures de l'efficacité photopique de l'œil humain en fonction des diverses radiations monochromatiques du spectre lumineux visible. Suivant les conditions diurnes ou nocturnes, on parlera de vision photopique ou scotopique.

L'adjectif photopique caractérise l'accommodation de l'œil aux conditions diurnes de luminance ambiante. D'une façon plus précise, l'état photopique est défini comme la réponse visuelle d'un observateur, doté d'une vue normale, à un stimulus produit par la lumière atteignant la fovéa (partie centrale la plus sensible de la rétine). La fovéa permet une bonne perception des détails et couleurs des objets dans des conditions données d'adaptation.

Dans le cas de la vision photopique (vision au niveau de la fovéa), l'efficacité lumineuse relative de l'œil varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. L'efficacité lumineuse de l'œil en vision photopique est maximale pour la longueur d'onde de 555 nanomètres. On peut établir la courbe de réponse de l'efficacité relative de l'œil pour les différentes longueurs d'onde du spectre visible, en prenant comme référence la valeur de cette efficacité pour la longueur d'onde de 555 nanomètres. On obtient la courbe ci-après, adoptée par la CIE pour un observateur normal moyen.

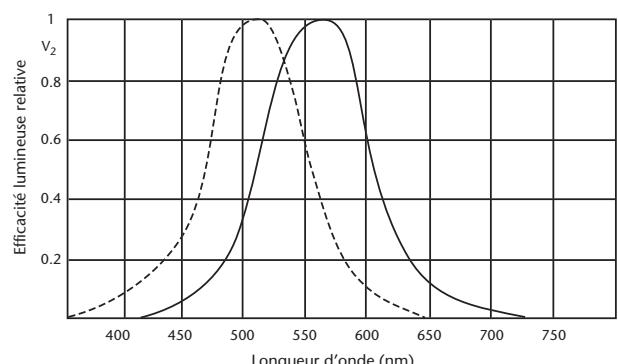


Figure 9.1. Efficacité lumineuse relative des diverses radiations monochromatiques pour l'œil moyen : traits pleins, vision diurne; traits interrompus, vision nocturne.

Dans le cas de la vision nocturne, la vision est dite scotopique (vision faisant intervenir les bâtonnets de la rétine à la place de la fovéa). Les bâtonnets, partie périphérique de la rétine, n'ont aucune sensibilité à la couleur et n'ont pas une bonne résolution, mais ils sont surtout sensibles aux faibles intensités lumineuses. En vision scotopique, l'efficacité lumineuse maximale correspond à la longueur d'onde de 507 nanomètres.

La vision scotopique demande une longue adaptation pouvant atteindre 30 minutes, alors que la vision photopique ne demande que deux minutes.

• Principales équations

Les principales équations applicables aux mesures de la visibilité sont définies par la loi de Bouguer-Lambert :

$$F = F_0 e^{-\sigma x} \quad (9.1)$$

où F est le flux lumineux reçu après un trajet x dans l'atmosphère et F_0 le flux pour $x = 0$. En différenciant cette formule, on obtient :

$$\sigma = \frac{-dF}{F} \cdot \frac{1}{dx} \quad (9.2)$$

Remarquons que cette loi n'est valable que pour une lumière monochromatique, cependant elle peut être appliquée avec une bonne approximation à un flux spectral. Le facteur de transmission T est donné par :

$$T = F/F_0 \quad (9.3)$$

Des relations mathématiques entre la POM et les diverses variables représentant l'état optique de l'atmosphère peuvent être déduites de la loi de Bouguer-Lambert.

C'est ainsi qu'à partir des équations 9.1 et 9.3 on peut écrire :

$$T = F/F_0 = e^{-\sigma x} \quad (9.4)$$

Si on applique cette loi à la définition de la Portée Optique Météorologique $T = 0,05$ et $x = P$, on peut écrire :

$$T = 0,05 = e^{-\sigma P} \quad (9.5)$$

D'où la relation mathématique entre la portée optique météorologique et le coefficient d'extinction :

$$P = (1/\sigma) \cdot \ln(1/0,05) \approx 3/\sigma \quad (9.6)$$

où \ln = log en base e ou log naturel. En combinant l'équation 9.4 déduite de la loi de Bouguer-Lambert et l'équation 9.6 on obtient :

$$P = x \cdot \ln(0,05)/\ln(T) \quad (9.7)$$

Cette formule sert de base aux mesures de la Portée Optique Météorologique à l'aide de transmissomètres [voir équation 9.14 où x est, dans ce cas, égal à la base de mesure a du transmissomètre].

• Visibilité météorologique de jour

Le contraste de luminance C est donné par :

$$C = \frac{L_b - L_h}{L_h} \quad (9.8)$$

où L_h est la luminance de l'horizon et L_b la luminance de l'objet.

La luminance du ciel à l'horizon vient de la lumière de l'air diffusée par l'atmosphère le long de la ligne de mire de l'observateur.

Remarquons que si l'objet est plus sombre que l'horizon, C est négatif, et si l'objet est noir ($L_b = 0$), $C = -1$.

En 1924, Koschmieder établit une relation (qui devint plus tard la Loi de Koschmieder) entre le contraste apparent (C_x) d'un objet vu sur l'horizon par un observateur éloigné, et son contraste inhérent (C_o), c'est-à-dire le contraste qui serait celui de cet objet par rapport à l'horizon s'il était vu à très courte distance. La relation de Koschmieder peut s'écrire sous la forme :

$$C_x = C_o e^{-\sigma x} \quad (9.9)$$

Cette relation est valable à condition que le coefficient de diffusion soit indépendant de l'angle azimutal et que l'éclairage soit uniforme sur tout le trajet séparant l'observateur de l'objet et de l'horizon.

Lorsqu'un objet noir est vu sur l'horizon ($C_o = -1$) et que le contraste apparent est de -0,05, l'équation 9.9 est alors réduite à :

$$0,05 = e^{-\sigma x} \quad (9.10)$$

Une comparaison de ce résultat avec l'équation 9.5 montre que lorsque la grandeur du contraste apparent d'un objet noir, vu sur l'horizon, est de 0,05, cet objet est alors à la Portée Optique Météorologique (POM).

• Visibilité météorologique de nuit

La distance à laquelle une lumière (repère de visibilité nocturne) peut être vue la nuit n'est pas uniquement liée à la POM. Elle dépend non seulement de la POM et de l'intensité de la lumière mais aussi de l'éclairage de l'œil de l'observateur par d'autres sources de lumière.

En 1876, Allard proposa la loi d'atténuation d'une source lumineuse ponctuelle d'intensité connue (I) comme fonction de la distance (x) et du coefficient d'extinction (σ). L'éclairement (E) de cette source est donné par :

$$E = I \cdot x^{-2} \cdot e^{-\sigma x} \quad (9.11)$$

Lorsque la source lumineuse est juste visible $E = E_v$, on peut alors écrire :

$$\sigma = (1/x) \cdot \ln \{I/(E_v \cdot x^2)\} \quad (9.12)$$

Si l'on note que $P = (I/\sigma) \cdot \ln (1/0,05)$ [équation 9.6], on peut écrire :

$$P = x \cdot \ln (1/0,05) / \ln (I/(E_v \cdot x^2)) \quad (9.13)$$

Cette relation entre la POM et la distance à laquelle les lumières peuvent être vues est présentée dans la section 9.2.3. L'application de cette équation aux observations visuelles est décrite à la section 9.2.

9.2 ESTIMATION VISUELLE DE LA PORTÉE OPTIQUE MÉTÉOROLOGIQUE

9.2.1 Généralités

Un observateur peut estimer visuellement la Portée Optique Météorologique à l'aide de repères naturels ou construits par l'homme (groupe d'arbres, rochers, tours, clochers, églises, lumières, etc...).

Dans chaque station, il convient de dresser un plan des repères utilisés pour les observations, en indiquant la distance et l'orientation de chaque repère par rapport à l'observateur. Ce plan devrait inclure des repères convenant pour les observations diurnes et des repères convenant pour les observations nocturnes. L'observateur devra également accorder une attention particulière aux variations significatives de la POM en fonction de la direction.

Les observations devraient être effectuées par des observateurs possédant une vision «normale» et convenablement formés. Elles devraient normalement être faites sans l'aide d'appareils optiques (jumelles, télescopes, théodolites, etc...) et, de préférence, pas à travers une vitre, particulièrement la nuit. L'œil de l'observateur devrait se trouver à une hauteur normale au-dessus du sol (environ 1,5 m); les mesures de visibilité ne devraient donc pas être effectuées depuis les étages supérieurs des tours de contrôle ou de tout autre bâtiment élevé. Ceci est d'autant plus important lorsque la visibilité est faible.

Lorsque la visibilité varie selon les directions, la valeur enregistrée ou relevée peut dépendre de l'usage auquel est destiné le relevé. Dans les messages synoptiques, la valeur à indiquer est la valeur la plus faible mais pour les comptes rendus destinés à l'aviation, il convient de suivre les directives données dans la publication de l'OMM (1990a).

9.2.2 Estimation de la Portée Optique Météorologique de jour

Pour les observations diurnes, des estimations visuelles de la visibilité donnent une bonne approximation de la valeur réelle de la Portée Optique Météorologique.

On devrait choisir comme repères pour les observations diurnes des objets situés à un aussi grand nombre de distances différentes que possible, à condition qu'ils soient noirs ou presque noirs et se détachent sur le ciel au-dessus de l'horizon. On éliminera donc, autant que faire se peut, les objets de couleur claire ou proches d'un arrière-plan terrestre. Ceci est particulièrement important lorsque le soleil illumine l'objet puisque, si l'albédo de celui-ci n'excède pas 0,25, l'erreur risque d'être alors très supérieure à 3%, tandis qu'elle ne dépassera pas ce seuil par temps couvert. Une maison blanche constitue par conséquent un mauvais repère alors qu'un bouquet d'arbres en est un bon, sauf quand il est brillamment éclairé par le soleil. Si l'on est obligé de prendre comme repère un objet se profilant sur un arrière-plan terrestre, la distance entre l'objet et l'arrière-plan devrait être au moins égale à la moitié de celle qui sépare l'objet du point d'observation. Un arbre situé à la lisière d'un bois, par exemple, ne serait pas un repère satisfaisant pour l'observation de la visibilité.

Pour être représentatives, les observations devraient être faites d'après des repères dont la dimension angulaire n'est pas inférieure à $0,5^\circ$ pour l'œil de l'observateur, car un repère qui sous-tend un angle inférieur devient invisible à une certaine distance, alors que des repères plus grands demeurent toujours visibles dans les mêmes conditions (un trou de 7,5 mm de diamètre percé dans un carton tenu à bout de bras sous-tend approximativement cet angle; un repère de visibilité vu par ce trou devrait donc le remplir complètement). D'autre part, un repère ne devrait pas sous-tendre un angle de plus de 5° .

9.2.3 Estimation de la Portée Optique Météorologique de nuit

Des méthodes pouvant servir à estimer la Portée Optique Météorologique de nuit à partir d'observations visuelles de la distance de perception de sources lumineuses sont décrites ci-après.

Toutes les sources lumineuses peuvent servir de repère de visibilité, à condition que leur intensité dans la direction de l'observation soit bien définie et connue. En général, il est cependant souhaitable d'utiliser des sources pouvant être considérées comme ponctuelles et dont l'intensité lumineuse ne soit pas plus forte dans une direction que dans une autre et ne soit pas contenue dans un angle solide trop restreint. La stabilité mécanique (fixation) et la stabilité optique de la source lumineuse doivent être soigneusement contrôlées.

Il conviendrait de distinguer les sources dites isolées, au voisinage desquelles il n'existe aucune autre source ou plage lumineuse, des sources groupées, même lorsque celles-ci sont distinctes les unes des autres. Cette dernière disposition pouvant affecter la visibilité de chaque source considérée séparément, seule l'utilisation de sources isolées et convenablement réparties est recommandable pour les mesures de visibilité de nuit.

Il conviendrait de noter que l'observation des repères lumineux de nuit peut être affectée sensiblement par l'ambiance lumineuse, par les effets physiologiques de l'éblouissement et par les lumières parasites, même situées hors du champ visuel, surtout lorsque l'observation est faite à travers une vitre. Ainsi, une observation précise et fiable ne peut être effectuée qu'à partir d'un endroit sombre, convenablement choisi et situé à l'extérieur de tout local.

D'autre part, l'importance des facteurs physiologiques ne peut pas être négligée, étant donné qu'ils constituent une source importante de dispersion des mesures. Il est essentiel de ne faire appel qu'à des observateurs qualifiés, dotés d'une vue normale. Il est également nécessaire de prévoir une période d'accommodation (de 5 à 15 minutes en général) pour permettre à l'œil de s'adapter à l'obscurité.

Dans la pratique, la relation existant entre la distance de perception d'une source lumineuse de nuit et la valeur de la POM peut s'exprimer de deux façons différentes :

- en indiquant, pour chaque valeur de la POM, la valeur de l'intensité de la source lumineuse, ainsi il y a une correspondance directe entre la distance à laquelle la source est perceptible et la valeur de POM ;
- en indiquant, pour une source d'intensité donnée, la correspondance entre la distance de perception de cette source et la valeur de la Portée Optique Météorologique.

Cette seconde façon de procéder est la plus aisée et la plus pratique, car il ne serait pas évident d'installer à différentes distances des sources lumineuses

d'intensité variable. Cette méthode consiste donc à utiliser des sources lumineuses existantes ou installées aux alentours de la station et à remplacer dans l'équation 9.13, I , x et E_t par les valeurs correspondant aux sources lumineuses disponibles. Les Services météorologiques peuvent donc dresser des tableaux donnant les valeurs de la POM en fonction de la luminance de fond et des sources lumineuses d'intensité connue. Les valeurs à attribuer au seuil d'éclairement E_t varient considérablement en fonction de la luminance ambiante. Il conviendrait d'utiliser les valeurs suivantes, considérées comme des valeurs moyennes pour les observateurs :

- $10^{-6.0}$ lux au crépuscule et à l'aube ou lorsque des sources artificielles fournissent une lumière appréciable ;
- $10^{-6.7}$ lux par clair de lune ou lorsque l'obscurité n'est pas encore complète ;
- $10^{-7.5}$ lux dans l'obscurité complète ou lorsqu'il n'y a pas d'autre lumière que celle des étoiles.

Les tableaux 9.1 et 9.2 ci-dessous donnent la correspondance entre la Portée Optique Météorologique et la distance de perception des sources lumineuses pour chacune des méthodes mentionnées ci-dessus et pour différentes conditions d'observation. Il a été établi dans le dessein d'aider les Services météorologiques à choisir ou installer les sources lumineuses qui serviront aux observations de visibilité de nuit et à rédiger à l'intention des observateurs des instructions sur le calcul des valeurs de la Portée Optique Météorologique.

Tableau 9.1. Relation entre la POM et l'intensité d'une source lumineuse ponctuelle juste visible pour trois valeurs de E_t

Valeur de la POM	Intensité lumineuse (en candelas) des lampes qui ne sont que juste visibles aux distances données dans la colonne P			
	P (m)	Crépuscule ($E_t = 10^{-6.0}$)	Clair de lune ($E_t = 10^{-6.7}$)	Obscurité totale ($E_t = 10^{-7.5}$)
100	0,2	0,04	0,006	
200	0,8	0,16	0,025	
500	5	1	0,16	
1 000	20	4	0,63	
2 000	80	16	2,5	
5 000	500	100	16	
10 000	2 000	400	63	
20 000	8 000	1 600	253	
50 000	50 000	10 000	1 580	

Une ampoule à incandescence ordinaire d'une puissance de 100 watts constitue une source lumineuse d'environ 100 cd.

Tableau 9.2.
Relation entre la POM et la distance à laquelle une source lumineuse ponctuelle de 100 candelas est juste visible, pour trois valeurs de E_t

Valeur de la POM	Distance de perception (en mètres) d'une lampe de 100 candelas en fonction de la valeur de la POM		
P (m)	Crépuscule ($E_t = 10^{-6.0}$)	Clair de lune ($E_t = 10^{-6.7}$)	Obscurité totale ($E_t = 10^{-7.5}$)
100	250	290	345
200	420	500	605
500	830	1 030	1 270
1 000	1 340	1 720	2 170
2 000	2 090	2 780	3 650
5 000	3 500	5 000	6 970
10 000	4 850	7 400	10 900
20 000	6 260	10 300	16 400
50 000	7 900	14 500	25 900

Étant donné les différences considérables qu'entraînent soit des variations relativement faibles des valeurs du seuil d'éclairement visuel, soit des conditions différentes d'éclairement général, il est clair que le but du tableau 9.2 ci-dessus n'est pas de donner un critère absolu de visibilité, mais de souligner la nécessité d'étalonner les sources lumineuses utilisées pour l'estimation de la POM la nuit et de rendre comparables, dans la mesure du possible, les observations de nuit effectuées en des endroits différents et par des services différents.

9.2.4 **Estimation de la Portée Optique Météorologique en l'absence de repères éloignés**

Dans certains endroits (plaine, navire, etc...), lorsque l'horizon est restreint (vallée ou cirque) ou encore en l'absence de points de repère appropriés, il est impossible de faire des observations, sauf pour de faibles valeurs de visibilité. Pour de tels cas, à moins de pouvoir procéder à des mesures instrumentales, on est obligé d'estimer les valeurs de la POM supérieures à celles pour lesquelles on dispose de repères, à partir de la transparence générale de l'atmosphère. On peut le faire en notant la netteté avec laquelle se détachent les points de repère les plus éloignés. Des contours nets et du relief, avec peu ou pas de flou dans les couleurs, indiquent que la POM est supérieure à la distance entre le point de repère et l'observateur. En revanche, des points de repère flous ou indistincts indiquent la présence de brume ou d'autres phénomènes qui réduisent la POM.

9.2.5

Exactitude des observations visuelles

• Généralités

L'observation des repères devrait être effectuée par des observateurs convenablement entraînés et possédant une vision dite normale. Ce facteur humain joue un rôle considérable dans l'estimation de la visibilité; en effet, dans les mêmes conditions atmosphériques, la capacité de perception et d'interprétation visuelle peut varier d'une personne à une autre.

• Exactitude des estimations visuelles de jour de la Portée Optique Météorologique

Les observations montrent que les estimations de la POM fondées sur les mesures instrumentales concordent raisonnablement avec les estimations diurnes de la visibilité. La visibilité et la POM devraient être égales lorsque le seuil de contraste de l'observateur est de 0,05 (selon le critère de reconnaissance) et que le coefficient d'extinction est le même au voisinage de l'instrument et de l'observateur.

Middleton (1952) a relevé, en se fondant sur 1 000 mesures, que le seuil moyen du rapport de contraste pour un groupe de 10 jeunes aviateurs formés comme observateurs météorologiques était de 0,033 avec une fourchette allant, pour les observations individuelles, de moins de 0,01 à plus de 0,2. Sheppard (1983) signale que lorsque l'on trace les données de Middleton sur une échelle logarithmique, elles correspondent relativement bien avec une distribution gaussienne. Si les données de Middleton représentent des conditions d'observation normales, on peut s'attendre à ce que les estimations diurnes de la visibilité soient en moyenne de 14 % supérieures à la POM, avec un écart-type égal à 20 %. Ces calculs correspondent tout à fait aux résultats de la première comparaison OMM des mesures de la visibilité (OMM, 1990b) qui a montré que, durant la journée, les estimations de la visibilité faites par les observateurs étaient supérieures d'environ 15 % aux mesures de POM effectuées à l'aide d'instruments. L'amplitude interquartile des différences entre les résultats donnés par l'observateur et par les instruments est d'environ 30 %. Ceci correspond à un écart-type d'environ 22 % avec une distribution gaussienne.

• Exactitude des estimations visuelles de nuit de la Portée Optique Météorologique

A l'aide du tableau 9.2 de la section 9.2.3, on voit aisément combien les valeurs de la Portée Optique Météorologique peuvent être trompeuses si elles sont basées seulement sur la distance à laquelle sont visibles des sources lumineuses ordinaires et si l'on ne tient pas compte de leur intensité ni des conditions

d'observation. Ceci souligne combien il importe de donner aux observateurs des instructions précises et explicites et de leur dispenser une formation à l'observation de la visibilité.

En pratique, il faut remarquer que le recours aux méthodes et aux tableaux décrits ci-dessus pour établir des plans de repères lumineux n'est pas toujours aisés. Les sources lumineuses servant de repère ne sont pas forcément bien disposées, d'intensité stable et connue, et ponctuelles. En ce qui concerne ce dernier point, on peut trouver des lampes à faisceau large ou étroit ou des lampes groupées, ou enfin des lampes de couleurs différentes, pour lesquelles l'œil a une sensibilité différente. En présence de telles lampes, il convient de faire preuve de grandes précautions.

L'estimation de la portée visuelle des sources lumineuses ne peut fournir des estimations fiables de la visibilité de nuit que si les sources lumineuses et le fond sur lequel elles se détachent sont choisis avec soin, les conditions d'observation dûment contrôlées et un temps considérable consacré à l'observation afin que les yeux de l'observateur soient pleinement accommodés aux conditions d'observation. Les résultats de la première comparaison OMM des mesures de la visibilité (OMM, 1990b) ont montré que pendant les heures d'obscurité les estimations de la visibilité données par les observateurs étaient supérieures d'environ 30 % aux mesures de la POM effectuées à l'aide d'instruments. L'amplitude interquartile des différences entre les résultats donnés par l'observateur et par les instruments n'est que légèrement supérieure à celle observée pour la journée (environ 35 à 40 % de la POM mesurée).

9.3 MESURE INSTRUMENTALE DE LA POM

9.3.1 Généralités

En posant certaines hypothèses, on peut convertir les mesures faites avec des instruments en valeurs de POM. Il n'y a donc pas toujours avantage à employer un instrument pour les mesures de jour si une série convenable de points de repère peut servir pour l'observation directe. Toutefois, un instrument de mesure de la visibilité est souvent utile pour les observations de nuit quand on ne dispose pas de points de repère ou encore pour les systèmes automatiques d'observation. Les instruments de mesure de POM peuvent être classés en deux groupes :

- a) ceux qui mesurent le coefficient d'extinction ou le facteur de transmission dans un tube cylindrique horizontal d'air. Cette atténuation de la lumière est due à la fois à la diffusion et à l'ab-

sorption par les particules d'air le long de la trajectoire du faisceau lumineux ;

- b) ceux qui mesurent le coefficient de diffusion de la lumière dans un petit volume d'air. Dans le cas du brouillard naturel, l'absorption est souvent négligeable et le coefficient de diffusion peut être considéré comme équivalent au coefficient d'extinction.

Ces deux groupes englobent des instruments utilisés pour des mesures visuelles faites par un observateur humain et des instruments utilisant une source lumineuse et un dispositif électronique comprenant une cellule photoélectrique ou une photodiode pour détecter le faisceau lumineux émis. Le principal inconvénient des instruments à mesure visuelle est le fait que des erreurs considérables peuvent se produire si l'observateur ne laisse pas sa vision s'accommoder suffisamment (plus particulièrement la nuit).

Les caractéristiques essentielles de ces deux catégories d'instruments servant à mesurer la POM sont décrites ci-dessous.

9.3.2 Instruments de mesure du coefficient d'extinction

• Instruments téléphotométriques

Un certain nombre de téléphotomètres qui mesurent, de jour, le coefficient d'extinction en comparant la luminance apparente d'un objet éloigné à celle du ciel à l'arrière plan ont été mis au point (par exemple : téléphotomètre de Löhle). Toutefois, de manière générale, ils ne sont pas employés pour les mesures courantes étant donné qu'il est préférable, comme il est exposé plus haut, de procéder à des observations visuelles directes. Ils peuvent néanmoins s'avérer utiles pour extrapoler la POM au-delà du repère le plus éloigné.

• Instruments de détermination visuelle par extinction

Pour la nuit, un instrument très simple d'utilisation se matérialise par un filtre neutre dégradé, réduisant dans une proportion connue la lumière venant d'une source lumineuse éloignée et ajusté tel que la lumière soit juste visible. La mesure lue sur l'instrument donne une mesure de la transparence de l'air entre la source lumineuse et l'observateur, à partir de laquelle on peut calculer le coefficient d'extinction. L'exactitude générale dépend principalement des variations de la sensibilité de l'œil et des fluctuations de l'intensité énergétique de la source lumineuse. L'erreur augmente en proportion de la POM.

L'avantage de cet instrument est qu'il permet d'évaluer la POM pour une gamme comprise entre

100 m et 5 km avec une exactitude raisonnable, en utilisant seulement trois sources lumineuses bien espacées les unes des autres, alors que, sans lui, un dispositif plus compliqué de sources lumineuses est indispensable pour atteindre la même exactitude. L'exactitude et l'homogénéité des mesures dépendent cependant grandement de la méthode d'utilisation de l'instrument (point d'apparition ou de disparition de la lumière).

• Transmissomètres

La méthode transmissométrique est la plus couramment utilisée pour mesurer le coefficient d'extinction moyen dans un cylindre d'air horizontal placé entre un émetteur composé d'une source lumineuse à flux modulé d'une puissance moyenne constante et un récepteur équipé d'un photodétecteur (le plus souvent une photodiode située au foyer d'un miroir parabolique ou d'une lentille). La source lumineuse la plus souvent utilisée est de type lampe à halogène ou tube à décharge d'impulsions au xénon. La modulation de la source lumineuse évite l'influence de la lumière parasite solaire. Le facteur de transmission est déterminé à partir du courant issu du photodétecteur, et permet alors le calcul du coefficient d'extinction et de la POM.

Etant donné que les estimations transmissométriques de la POM sont basées sur la perte de lumière d'un faisceau de rayons lumineux parallèles, laquelle dépend de la diffusion et de l'absorption, elles sont étroitement liées à la définition de la POM. Un bon transmissomètre, correctement entretenu et fonctionnant dans sa gamme de plus haute exactitude, donne une très bonne approximation de la POM vraie.

Il existe deux types de transmissomètres :

- ceux dont l'émetteur et le récepteur sont placés dans des boîtiers différents à une distance connue l'un de l'autre, illustrés sur la figure 9.2;

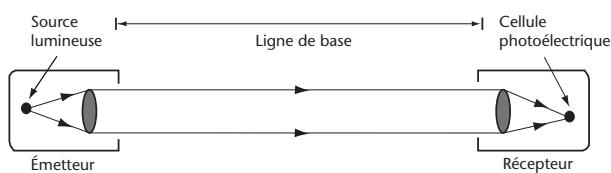


Figure 9.2. Transmissomètre à faisceau direct

- ceux dont l'émetteur et le récepteur sont placés dans le même boîtier, mais dont la lumière émise est réfléchie par un miroir ou rétroréflecteur placé à distance (aller et retour du faisceau lumineux), illustrés à la figure 9.3.

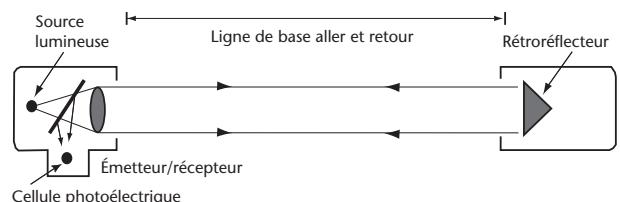


Figure 9.3. Transmissomètre à faisceau réfléchi

La distance parcourue par la lumière entre l'émetteur et le récepteur est communément appelée «base du transmissomètre» et peut varier de quelques mètres à 150 mètres (voire 300 mètres) suivant la gamme de valeurs de la POM que l'on désire mesurer et les applications auxquelles les mesures sont destinées.

Nous avons vu dans l'expression de la POM donnée par l'équation 9.7, que la relation :

$$P = a \cdot \ln (0.05) / \ln (T) \quad (9.14)$$

dans laquelle a est la base du transmissomètre, est la formule de base des mesures transmissométriques, en admettant que l'application des lois de Koschmieder et Bouguer-Lambert soit acceptable et que le coefficient d'extinction soit le même le long de la base du transmissomètre que sur le trajet qui sépare un observateur et un objet à cette valeur de la POM. Bien que la relation entre le facteur de transmission et la POM soit acceptable dans le cas de gouttelettes d'eau de brouillard, lorsque la visibilité est réduite par d'autres hydrométéores tels que pluie ou neige ou par des lithométéores (chasse-sable) les valeurs mesurées de la POM doivent être prises avec beaucoup de circonspection.

Afin que les mesures puissent rester valables durant une longue période, il est nécessaire que le flux lumineux reste constant durant ce temps. Dans le cas d'utilisation de la lumière halogène, le problème du vieillissement du filament de la lampe est moins critique et le flux reste plus constant. Néanmoins, certains transmissomètres utilisent des dispositifs à rétroaction (en captant et en mesurant une petite partie du flux émis) permettant ainsi d'assurer une plus grande homogénéité du flux lumineux dans le temps ou de compenser toute modification.

Comme nous le verrons à la section traitant de l'exactitude des mesures de la POM, la valeur choisie pour la base du transmissomètre conditionne la gamme de mesure de la POM. On admet généralement que cette gamme est comprise entre une et 25 fois la valeur de la base.

Une variante dans le principe de mesure par transmissomètre consiste à utiliser deux récepteurs ou rétroréflecteurs placés à des distances différentes afin

d'élargir la gamme mesurée de la POM, aussi bien vers le bas (courte base) que vers le haut de la gamme (longue base). Ces instruments sont alors appelés transmissomètres à «double base».

Dans quelques cas de très courtes bases (quelques mètres), on a eu recours à la lumière émise par une photodiode, c'est-à-dire à une lumière monochromatique proche de l'IR. Cependant, on recommande généralement d'utiliser de la lumière polychromatique dans le visible, afin d'obtenir un coefficient d'extinction représentatif.

• Lidars de mesure de la visibilité

On peut recourir à la technique du lidar (déttection et localisation par la lumière), qui fonctionne selon le principe décrit pour le célosmètre à laser dans le chapitre 15 de la Partie I, pour mesurer la visibilité lorsque le faisceau est orienté sur le plan horizontal. Le profil de résolution en portée du signal rétrodiffusé S dépend du signal de sortie S_0 , de la distance x , du coefficient de rétrodiffusion β et du facteur de transmission T , selon la formule suivante :

$$S(x) \sim S_0 \cdot 1/x^2 \cdot \beta(x) \cdot T^2 \text{ où } T = \int -\sigma(x) dx \quad (9.15)$$

Dans des conditions d'homogénéité horizontale de l'atmosphère, β et σ sont constants et le coefficient d'extinction σ est déterminé à partir de seulement deux points du profil :

$$\ln(S(x) \cdot x^2 / S_0) \sim \ln \beta - 2 \sigma x \quad (9.16)$$

Dans une atmosphère non homogène, les quantités $\beta(x)$ et $\sigma(x)$, liées à la portée, peuvent être différencierées au moyen de l'algorithme de Klett (Klett, 1985).

Plus la POM approche les 2 000 m, plus l'exactitude de cette méthode laisse à désirer.

9.3.3 Instruments de mesure du coefficient de diffusion

L'atténuation de la lumière dans l'atmosphère est due à la fois à sa diffusion et à son absorption. La présence de polluants au voisinage des zones industrielles, de cristaux de glace (brouillard givrant) ou de poussière peut faire de l'absorption un élément important. Toutefois, le facteur d'absorption est le plus souvent négligeable et les phénomènes de diffusion par réflexion, réfraction et diffraction sur les gouttelettes d'eau constituent le principal facteur de réduction de la visibilité. Le coefficient d'extinction peut alors être considéré comme égal au coefficient de diffusion, et un instrument de mesure de ce coefficient de diffusion peut donc être utilisé pour estimer la POM.

La méthode la plus pratique pour effectuer cette mesure consiste à concentrer un faisceau lumineux sur un petit volume d'air et à déterminer, par des moyens photométriques, la proportion de lumière diffusée dans un angle solide suffisamment grand et dans des directions qui ne sont pas privilégiées. À condition qu'il soit complètement protégé contre d'autres sources de lumière, un tel instrument peut être utilisé de jour aussi bien que de nuit. Le coefficient de diffusion b est une fonction qui peut se mettre sous la forme :

$$b = \frac{2\pi}{\Phi} \int_0^\pi I(\phi) \sin(\phi) d\phi \quad (9.17)$$

où Φ est le flux émis dans le volume d'air V et $I(\Phi)$ est l'intensité lumineuse reçue dans la direction Φ par rapport au faisceau incident.

Notons que pour déterminer b avec exactitude il est nécessaire de mesurer et d'intégrer la lumière diffusée par le faisceau sur tous les angles. Les instruments utilisés dans la pratique mesurent la lumière diffusée sur un angle limité et l'on part de l'hypothèse d'une corrélation élevée entre l'intégrale limitée et l'intégrale complète.

Trois types de mesure sont utilisés dans ces instruments: la diffusion arrière, la diffusion avant et la diffusion intégrée sur un grand angle.

a) *Diffusion arrière* : dans ce type d'instruments (figure 9.4), un faisceau lumineux est concentré sur un petit volume d'air situé en avant du projecteur, le récepteur, placé dans le même habitacle et en dessous de l'émetteur, recevant la lumière rétrodiffusée par le volume d'air examiné. Plusieurs chercheurs ont essayé de trouver une relation entre la visibilité et le coefficient de diffusion arrière, mais il est généralement admis que la corrélation n'est pas satisfaisante.

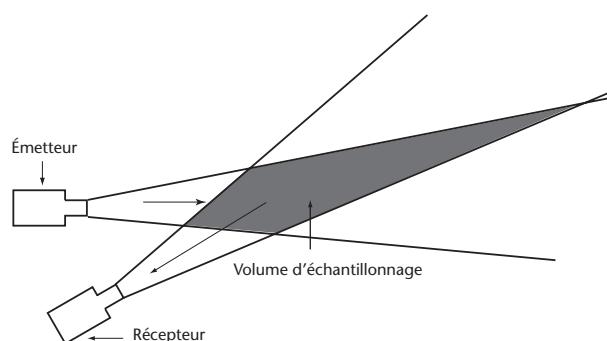


Figure 9.4. Instrument de mesure de la visibilité mesurant la rétrodiffusion

- b) *Diffusion avant* : plusieurs auteurs ont montré que l'angle le plus favorable était compris entre 20° et 50°. Les instruments sont donc constitués d'un émetteur et d'un récepteur dont les faisceaux d'émission et de réception font entre eux un angle de 20 à 50 degrés. Une autre disposition consiste, soit à placer un diaphragme à mi-distance entre l'émetteur et le récepteur, soit à placer deux diaphragmes situés réciproquement à peu de distance de l'émetteur et du récepteur. La figure 9.5 est une illustration des deux configurations utilisées.

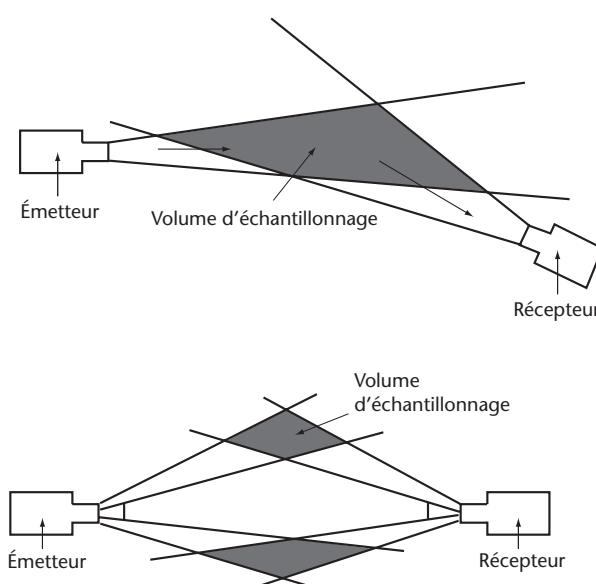


Figure 9.5.
Instruments de mesure de la visibilité
mesurant la diffusion avant,
présentés selon deux configurations

- c) *Diffusion sous un grand angle* : Ce type d'instrument (voir figure 9.6), plus connu sous le nom de néphélomètre intégrateur, est basé sur le principe de la mesure de la diffusion sous un angle aussi large que possible, de 0° à 180° dans l'idéal, mais en pratique de 0° à 120°. Le récepteur est placé perpendiculairement à l'axe de la source lumineuse qui émet une lumière sur un grand angle. Si en théorie ce type d'instrument devrait fournir une meilleure estimation du coefficient de diffusion qu'un instrument opérant sur une gamme réduite d'angle de diffusion, dans la pratique il est plus difficile d'éviter que la présence de l'instrument ne modifie le coefficient d'extinction dans l'air mesuré. Les néphélomètres intégrateurs ne sont pas très utilisés pour mesurer la POM et sont destinés avant tout aux mesures de polluants.

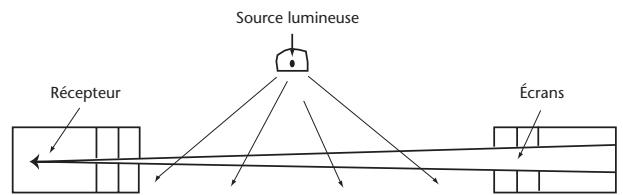


Figure 9.6. Instrument de mesure de la visibilité mesurant la lumière diffusée sous un grand angle

Dans tous ces équipements, les récepteurs sont constitués, comme pour la plupart des transmissomètres, de cellules photodéetectrices ou photodiodes. On utilise un faisceau lumineux pulsé (par exemple, décharge à forte intensité dans le xénon).

Ces types d'instruments ne requièrent qu'un espace limité (un à deux mètres en général). Ils sont donc utiles lorsque l'on ne dispose pas de points de repère ou de sources lumineuses (navires, bords de route, etc.). Comme la mesure ne porte que sur un très petit volume d'air, la représentativité des mesures par rapport à l'état général de l'atmosphère sur le site peut être mise en doute. Toutefois, une moyenne sur un certain nombre d'échantillons ou de mesures peut améliorer cette représentativité. De plus, on peut parfois réaliser un lissage des résultats en éliminant les cas extrêmes.

L'utilisation de ce type d'instrument a été souvent limitée à des applications particulières (par exemple, mesure de la visibilité sur autoroute ou détection de la présence ou de l'absence de brouillard) ou à des cas où l'on peut se contenter de mesurer la POM d'une manière moins précise. La tendance actuelle serait de les utiliser de plus en plus dans les systèmes automatiques d'observations météorologiques car ils permettent de mesurer la POM sur une gamme étendue et sont peu affectés par la pollution par comparaison avec les transmissomètres.

9.3.4 Exposition et implantation des instruments

Les emplacements des instruments de mesure devraient être choisis de façon à ce que les mesures obtenues soient représentatives de l'usage auquel elles sont destinées. Ainsi, pour les besoins synoptiques généraux, les appareils devraient être installés à des emplacements abrités d'une pollution atmosphérique locale (par exemple, fumée, pollution industrielle, routes poussiéreuses, etc.).

Le volume d'air à partir duquel le coefficient d'extinction ou de diffusion est mesuré devrait normalement se trouver au niveau de l'œil d'un observateur, soit à environ 1,5 m au-dessus du sol.

Il convient de rappeler que les transmissomètres et les appareils de mesure du coefficient de diffusion devraient être installés de telle sorte que le soleil ne puisse se trouver à aucun moment de la journée dans leur champ optique. Pour ce faire on peut soit orienter l'axe optique horizontalement dans la direction nord-sud ($\pm 45^\circ$ près), soit utiliser un système d'écrans ou chicanes pour des latitudes inférieures à 50° .

Pour les besoins aéronautiques, les mesures seront représentatives des conditions régnant sur l'aéroport. Ces conditions, plus particulières à l'exploitation des aéroports, sont décrites dans le chapitre 2 de la Partie II de ce Guide.

Les instruments doivent être installés selon les directives données par les fabricants. On accordera une attention particulière au bon alignement des émetteurs et des récepteurs des transmissomètres et au réglage correct du faisceau lumineux. Les poteaux sur lesquels reposent les émetteurs-récepteurs devront avoir une rigidité mécanique (tout en étant frangibles dans le cas des aéroports) afin d'éviter tout désalignement dû à la mouvance du sol lors du gel et surtout du dégel. De plus, les supports ne devraient pas se déformer sous les contraintes thermiques auxquelles ils sont soumis.

9.3.5 Étalonnage et entretien des instruments

Pour permettre des observations satisfaisantes et sûres, les instruments de mesure de la POM devraient être utilisés et entretenus selon les conditions prescrites par les fabricants et maintenus d'une façon permanente en bon état de fonctionnement. L'exécution régulière des opérations de contrôle et d'étalonnage selon les recommandations du fabricant assurera un fonctionnement optimal.

Des étalonnages par très bonne visibilité (supérieure à 10-15 km) devront être effectués régulièrement. Cependant, il y a lieu d'éviter les conditions atmosphériques pouvant entraîner des erreurs d'étalonnage. En effet, par exemple, par temps de forte ascendance thermique ou après de fortes pluies, on rencontre d'importantes variations du coefficient d'extinction dans la couche d'air près du sol et si plusieurs transmissomètres sont en service sur le site (cas des aéroports) une dispersion de leurs mesures est constatée. Il conviendrait de ne pas entreprendre d'étalonnage dans de telles conditions.

Il est à remarquer que dans le cas de la plupart des transmissomètres, les optiques doivent être nettoyées régulièrement et que pour certains ins-

truments, plus particulièrement des instruments installés sur aéroports, des entretiens journaliers devront être prévus. Les instruments devraient être nettoyés lors et/ou après de fortes perturbations, la pluie ou les averses violentes accompagnées de vent fort pouvant recouvrir les systèmes optiques de nombreuses gouttes d'eau et particules solides occasionnant de grossières erreurs dans la mesure de la POM. Il en sera de même pour les chutes de neige qui risquent d'obstruer les systèmes optiques. Des dispositifs de chauffage sont souvent placés à l'avant des systèmes optiques pour améliorer les performances de ces instruments lors de telles intempéries. Des dispositifs de soufflant sont parfois également installés devant les optiques dans le même but. Cependant, l'attention sera attirée sur le fait que ces soufflantes et ces dispositifs chauffants peuvent provoquer des remous d'air plus chaud que l'air environnant et perturber la mesure du coefficient d'extinction de la masse d'air. Dans les zones arides, des tempêtes de sable ou des phénomènes de chasse-sable élevée peuvent nuire au système optique et même le détériorer.

9.3.6 Sources d'erreur dans les mesures de la portée optique météorologique et estimations de l'exactitude

- Généralités

Tous les instruments utilisés dans la pratique pour mesurer la POM n'effectuent cette mesure que sur une zone de l'atmosphère relativement restreinte par rapport à celle que balaie l'œil d'un observateur humain. Les instruments ne peuvent donner de mesure exacte de la POM que lorsque le volume d'air examiné est représentatif de l'atmosphère qui entoure le point d'observation dans un rayon égal à la valeur de la POM. On peut aisément concevoir une situation dans laquelle, du fait d'un banc de brouillard ou d'une averse isolée de pluie ou de neige, l'instrument donnerait une mesure erronée. Toutefois, l'expérience montre que de telles situations ne sont pas fréquentes et qu'une surveillance continue de la POM à l'aide d'un instrument permet souvent de détecter des changements de ce paramètre avant qu'un observateur travaillant sans aide mécanique ne s'en aperçoive. Néanmoins, il importe d'interpréter les mesures instrumentales de la POM avec précautions.

Un autre facteur à prendre en compte lorsque l'on examine la représentativité des mesures est l'homogénéité de l'atmosphère elle-même. Pour toutes les valeurs de la POM, le coefficient d'extinction d'un petit volume d'atmosphère fluctue rapidement et de manière irrégulière; aussi, prises individuellement, les mesures de la POM effectuées à l'aide de diffusomètres et de transmissomètres à base courte non

pourvus de systèmes intégrés de lissage ou de calcul de moyenne présentent une dispersion considérable. Il est donc nécessaire de réaliser de nombreuses mesures et d'effectuer un lissage ou d'établir une moyenne si l'on souhaite obtenir une valeur représentative de la POM. L'analyse des résultats de la première comparaison OMM des mesures de la visibilité (OMM, 1990b) montre qu'avec la plupart des instruments on ne retire aucun bénéfice du calcul d'une moyenne sur plus d'une minute mais que pour les appareils les plus «bruyants» il est préférable d'établir une moyenne sur deux minutes.

• Exactitude des téléphotomètres et des appareils de détermination visuelle par extinction

Les mesures visuelles basées sur le coefficient d'extinction sont difficiles à réaliser et la principale source d'erreur est la variabilité et l'incertitude liées au fonctionnement de l'œil humain. Ces erreurs ont été décrites dans les sections se rapportant aux méthodes d'estimation visuelle de la POM.

• Exactitude des transmissomètres

Pour les mesures transmissométriques, les sources d'erreurs peuvent être résumées comme suit :

- mauvais alignement des émetteurs et récepteurs;
- rigidité et stabilité insuffisantes des supports des émetteurs-récepteurs (gel et dégel du sol, contrainte thermique);
- mauvais centrage et vieillissement des lampes d'émission ;
- erreur d'étalonnage (visibilité trop faible ou étalonnage effectué par temps instable affectant le coefficient d'extinction) ;
- instabilité de l'électronique associée au système ;
- transmission à distance du coefficient d'extinction sous forme de faibles courants pouvant être perturbés (surtout sur les aéroports) par les champs électromagnétiques parasites. Il est préférable de numériser les signaux ;
- perturbation due au soleil levant ou couchant et à la mauvaise orientation préalable de l'axe des transmissomètres ;
- pollution atmosphérique salissant les systèmes optiques ;
- conditions atmosphériques locales (averses de pluie et vents forts, neige...) entraînant de fausses valeurs du coefficient d'extinction ou n'obéissant pas à la loi de Koschmieder (neige, cristaux de glace, pluie, sable...).

L'utilisation d'un transmissomètre correctement étalonné et entretenu comme il convient devrait permettre une bonne représentativité des mesures de la POM si le coefficient d'extinction le long du trajet optique de l'instrument est représentatif du coefficient d'extinction sur l'ensemble de la POM. Toutefois, un transmissomètre ne peut donner de

mesures exactes de la POM que sur une portée limitée. On peut établir une courbe d'erreur relative de la POM en différenciant la formule transmissométrique de base (voir équation 9.7). La figure 9.7 montre la variation de l'erreur relative en fonction de la transmission si on suppose que l'exactitude de la mesure du facteur de transmission (T) est de 1 %.

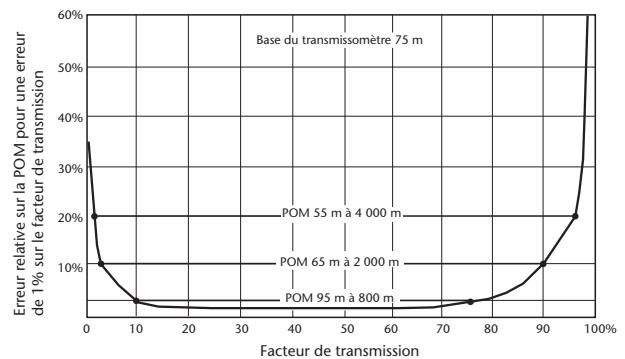


Figure 9.7. Erreur dans les mesures de la Portée Optique Météorologique en fonction d'une erreur de 1 % sur le facteur de transmission

Cette valeur de 1% de l'erreur sur la transmission peut être considérée comme correcte pour beaucoup d'instruments anciens; toutefois, elle ne tient pas compte de la dérive de l'instrument, de la saleté sur les composantes optiques, ni de la dispersion des mesures due au phénomène lui-même. Si l'exactitude tombe à 2 ou 3% environ (en tenant compte de ces autres facteurs), les valeurs de l'erreur relative figurant sur l'axe vertical du graphique doivent être multipliées par ce même facteur de 2 ou 3. On notera également que l'erreur relative sur la mesure de la POM augmente de manière exponentielle à chaque extrémité de la courbe, ce qui fixe donc des limites supérieure et inférieure à la gamme de mesure de la POM. L'exemple donné montre les limites de l'amplitude de mesure pour une erreur acceptée de 5, 10 et 20% dans le cas où la ligne de base est de 75 m. On peut également en déduire que pour des mesures de POM comprises entre les limites de 1,25 et 10,7 fois la longueur de la base, l'erreur relative sur la POM devrait être faible et de l'ordre de 5% si l'on suppose que l'erreur sur T est de 1%. Lorsque la POM est inférieure à 0,87 fois la longueur de la base ou supérieure à 27 fois cette longueur, l'erreur relative sur sa mesure dépasse 10%. Si l'on élargit encore l'amplitude de la mesure, l'erreur s'accroît rapidement pour devenir inacceptable.

Les résultats de la première comparaison OMM de mesures de la visibilité (OMM, 1990b) ont toutefois montré que, lorsqu'ils sont bien étalonnés et bien

entretenus, les meilleurs transmissomètres peuvent fournir des mesures de la POM avec une erreur type d'environ 10 % lorsque la valeur de la POM va jusqu'à 60 fois la longueur de leur base.

• Exactitude des instruments de mesure de la diffusion

Avec ce type d'instrument, les principales sources d'erreurs dans les mesures de la POM sont les suivantes :

- a) erreur d'étalonnage (visibilité trop faible ou étalonnage effectué dans des conditions d'instabilité ayant des incidences sur le coefficient d'extinction) ;
- b) non-reproductibilité du procédé ou du matériel en cas d'utilisation de diffuseurs opaques pour l'étalonnage ;
- c) instabilité des composants électroniques du système ;
- d) transmission à distance du coefficient d'extinction sous forme de faibles courants pouvant être perturbés (surtout sur les aéroports) par les champs électromagnétiques parasites. Il est préférable de numériser les signaux ;
- e) perturbation due au soleil levant ou couchant et à la mauvaise orientation préalable de l'instrument ;
- f) pollution atmosphérique salissant les systèmes optiques (ces instruments sont beaucoup moins sensibles que les transmissomètres à la

saleté sur leurs optiques mais les salissures importantes exercent néanmoins un effet) ;
g) conditions atmosphériques (pluie, neige, cristaux de glace, pollution locale...) entraînant un coefficient de diffusion différent du coefficient d'extinction.

D'après les résultats de la Première comparaison OMM des mesures de la visibilité (OMM, 1990b), les instruments de mesure de la diffusion donnent des résultats généralement moins exacts que les transmissomètres pour les faibles valeurs de la POM et sont sujets à une plus grande variabilité. Il est également apparu que ce type d'instrument était dans l'ensemble plus affecté que les transmissomètres par les précipitations. Toutefois, les meilleurs diffusomètres se sont révélés peu ou pas affectés par les précipitations et ont donné des estimations de la POM avec un écart type d'environ 10 % sur une gamme de valeurs de POM allant d'environ 100 m à 50 km. Presque tous les diffusomètres soumis à cette comparaison ont présenté une erreur systématique importante sur une partie de leur gamme de mesure. Ces appareils se sont montrés très peu affectés par une contamination de leurs optiques.

Un aperçu des différences qui existent entre les diffusomètres et les transmissomètres est donné dans la publication de l'OMM (1992b).

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Commission électrotechnique internationale, 1987 : *Vocabulaire électrotechnique international* : Chapitre 845 : Eclairage : CEI 50
- Klett, J.D., 1985 : Lidar Inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Applied Optics*, 24, pp. 1638–1643
- Middleton, W. E. K., 1952 : *Vision Through the Atmosphere*. University of Toronto Press, Toronto.
- Organisation météorologique mondiale, 1989 : *Guide du Système mondial d'observation*. OMM-N° 488, Genève
- Organisation météorologique mondiale, 1990a : *Guide des Systèmes d'observation et de diffusion de l'information météorologiques aux aérodromes*. OMM-N° 731, Genève
- Organisation météorologique mondiale, 1990 : *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report* (D. J. Griggs, D. W. Jones, M. Ouldridge, W. R. Sparks). Rapport N° 41 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 401, Genève
- Organisation météorologique mondiale, 1992a : *Vocabulaire météorologique international*, OMM-N° 182, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992b : Visibility measuring instruments: Differences between scatterometers and transmissometers (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92)* (Vienne, Autriche, 11–15 mai 1992), Rapport N° 49 de la série consacrée aux instruments et méthodes d'observation 49, OMM/TD-N° 462, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Guide du Système mondial d'observation*. OMM-N° 544, Genève.
- Sheppard, B.E., 1983 : Adaptation to MOR. *Preprints of the Fifth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation* (Toronto, 11–15 Avril 1983), pp. 226–269.

CHAPITRE 10

MESURE DE L'ÉVAPORATION

10.1 GÉNÉRALITÉS

10.1.1 Définition

Dans le *Glossaire international d'hydrologie* (UNESCO/OMM, 1992) et le *Vocabulaire météorologique international* (OMM, 1992), on trouve les définitions suivantes (attention aux nuances) :

- **Évaporation réelle** : Quantité d'eau qui s'évapore d'une surface d'eau libre ou du sol.
- **Transpiration** : Processus par lequel l'eau des végétaux est transférée dans l'atmosphère sous forme de vapeur.
- **Évapotranspiration réelle (ou évapotranspiration effective)** : Quantité totale d'eau qui s'évapore du sol et des plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturel.
- **Évaporation potentielle (ou évaporativité)** : Quantité de vapeur d'eau pouvant être émise par une surface d'eau pure, par unité de surface et de temps, dans les conditions atmosphériques existantes.
- **Évapotranspiration potentielle** : Quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré. Elle s'exprime en hauteur d'eau.

Si l'on emploie le terme **évapotranspiration potentielle**, il convient d'indiquer clairement les types d'évaporation et de transpiration en cause. Pour obtenir de plus amples informations, se reporter à la publication de l'OMM (1994).

10.1.2 Unités et échelles

Le taux d'évaporation est défini comme la quantité d'eau qui s'évapore d'une unité de surface par unité de temps. Il peut être exprimé comme la masse ou le volume d'eau liquide ainsi évaporée. Habituellement, il s'agit de la hauteur d'eau liquide qui retourne à l'atmosphère par unité de temps en s'évaporant depuis l'ensemble de la surface considérée. L'unité de temps est normalement le jour et l'unité de hauteur, le millimètre ou le centimètre (OMM, 2003). Selon le degré de perfectionnement de l'instrument, l'exactitude des mesures varie généralement de 0,1 à 0,01 mm.

10.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Les estimations de l'évaporation à partir des surfaces d'eau libre et du sol ainsi que de l'évapotranspiration à partir des surfaces couvertes de végétation jouent un rôle d'une grande importance dans la modélisation hydrologique et dans les études hydrométéorologiques et agricoles, par exemple pour ce qui est de la conception et de l'exploitation des réservoirs et des réseaux d'irrigation et de drainage.

Les exigences de qualité sont données au chapitre 1, Partie I. Pour les totaux journaliers, une marge extrême va de 0 à 100 mm, avec une résolution de 0,1 mm. L'incertitude, au niveau de confiance de 95 pour cent, devrait être de $\pm 0,1$ mm pour les quantités inférieures à 5 mm, et de ± 2 pour cent pour les quantités supérieures. Le chiffre de un mm a été proposé comme exactitude réalisable. En principe, les instruments habituels pourraient satisfaire ces exigences d'exactitude, mais des difficultés d'exposition et la mise en œuvre pratique sont la cause d'erreurs beaucoup plus importantes (OMM, 1976).

Le taux d'évaporation qui se produit à partir d'un corps ou d'une surface quelconque est déterminé par différents facteurs, tous également susceptibles de l'influencer, que l'on peut répartir en deux grandes catégories: les facteurs météorologiques et les facteurs propres à la surface évaporante. Les facteurs météorologiques sont à leur tour subdivisibles en variables énergétiques et en variables aérodynamiques. L'évaporation de l'eau liquide exige de l'énergie, laquelle existe en abondance dans la nature sous la forme du rayonnement solaire et terrestre. Les variables aérodynamiques, comme la vitesse du vent au niveau de la surface évaporante et le gradient de tension de vapeur entre cette surface et la basse atmosphère, gouvernent le taux de transfert de la vapeur d'eau évaporée.

Il convient de distinguer les situations où il existe de l'eau libre sur la surface évaporante de celles où il n'y en a pas. Parmi les principaux facteurs entrant en jeu figurent la quantité et l'état de l'eau ainsi que les caractéristiques de la surface qui influent sur le processus de transfert vers l'atmosphère ou à travers la surface du corps considéré. La résistance au transfert d'humidité vers l'atmosphère est par exemple fonction de la rugosité de la surface; dans les régions arides et semi-arides, l'étendue et la forme de

la surface évaporante jouent aussi un rôle capital. La transpiration végétale, outre qu'elle dépend des facteurs météorologiques et des particularités de la surface évaporante mentionnés précédemment, est aussi dans une large mesure tributaire des caractéristiques et des réactions des plantes, et notamment du nombre, de la taille et du degré d'ouverture des stomates. La résistance des stomates au transfert d'humidité indique une réaction diurne, mais est aussi fortement subordonnée à l'humidité du sol où poussent les racines.

La quantité d'eau du sol dont peuvent disposer les racines et qui est amenée à s'évaporer des sols nus dépend des apports capillaires, c'est-à-dire de la texture et de la composition du sol. Quant à l'évaporation à partir des lacs et des réservoirs, elle est en partie fonction de la chaleur accumulée dans la masse d'eau.

Les méthodes d'évaluation de l'évaporation et de l'évapotranspiration sont généralement du type indirect, soit par mesures ponctuelles à l'aide d'un instrument ou d'un appareil de mesure, soit par calculs effectués à partir d'autres variables météorologiques mesurées (OMM, 1997).

10.1.4 Méthodes de mesure

Il est actuellement impossible de mesurer directement l'évaporation ou l'évapotranspiration à partir de vastes étendues naturelles d'eau ou de terre ferme. On a toutefois élaboré diverses méthodes indirectes dérivées de mesures ponctuelles ou d'autres calculs qui donnent des résultats acceptables.

Les évaporomètres, parmi lesquels on distingue les atmomètres et les bacs et bassins d'évaporation, servent à mesurer la perte en eau d'une surface saturée standard. Ces instruments ne permettent de mesurer directement ni l'évaporation qui se produit à partir des plans d'eau naturels, ni l'évapotranspiration réelle ou potentielle. Il importe donc, avant utilisation, de corriger les valeurs obtenues afin d'obtenir des estimations fiables de l'évaporation des lacs et de l'évapotranspiration réelle et potentielle à partir des surfaces naturelles.

Les évapotranspiromètres (ou lysimètres) sont des récipients que l'on place sous la surface du sol et qu'on remplit de sol dans lequel des végétaux peuvent être cultivés. Il s'agit de dispositifs polyvalents qui permettent d'étudier différentes phases du cycle hydrologique dans des conditions naturelles. Il est possible de faire des estimations de l'évapotranspiration (ou de l'évaporation en cas de sol nu) en mesurant et en équilibrant l'ensemble des autres éléments du bilan hydrique intervenant dans le récipient, à savoir la précipitation, le drainage profond et les variations

de l'emmagasinement dans le volume de sol concerné. Le ruissellement est habituellement éliminé. On utilise aussi les évapotranspiromètres pour mesurer l'évaporation ou l'évapotranspiration potentielle à partir du sol (selon qu'il est ou non recouvert de végétation), en faisant en sorte que l'humidité du sol corresponde à la capacité au champ.

Les estimations concernant des réservoirs ou des lacs, des parcelles ou de petits bassins versants peuvent être obtenues par le biais d'un bilan hydrique, d'un bilan énergétique, d'une étude aérodynamique et de moyens complémentaires. Ces dernières techniques sont examinées à la section 10.5.

Il faut aussi souligner que les divers évaporomètres ou lysimètres fournissent des mesures fondamentalement différentes. Les facteurs d'ajustement qui permettent d'obtenir, à partir de ces mesures, des estimations de l'évaporation des lacs ou de l'évapotranspiration réelle ou potentielle diffèrent nécessairement. Il importe donc que ces instruments et leur mode d'exposition soient toujours décrits avec beaucoup de soin et de précision, de sorte que l'utilisateur saisisse au mieux les conditions de mesure.

Pour plus de précisions sur toutes ces méthodes, on se reportera à la publication de l'OMM (1994).

10.2 ATMOMÈTRES

10.2.1 Différents types d'instruments

Un atmomètre est un instrument qui permet de mesurer la perte en eau d'une surface poreuse mouillée. Les surfaces mouillées sont constituées soit par des sphères, des cylindres ou des plaques en porcelaine poreuse, soit par des rondelles de papier filtre, tous saturés d'eau. Dans le cas de l'atmomètre de Livingstone, l'élément évaporant est une sphère d'environ cinq centimètres de diamètre, reliée à un réservoir par un tube de verre ou de métal; la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface de l'eau contenue dans le réservoir maintient la sphère saturée. L'atmomètre de Bellani se compose d'un disque en porcelaine poreuse fixé au sommet d'un entonnoir en porcelaine vitrifiée, où arrive de l'eau provenant d'une éprouvette graduée qui tient lieu à la fois de réservoir et de dispositif de mesure. Quant à l'évaporomètre de Piche, son élément évaporant est une rondelle de papier filtre fixée au bas d'un tube gradué à l'envers et fermé à son sommet, qui contient l'eau destinée à humidifier la rondelle; des mesures successives du volume d'eau restant dans le tube indiquent la quantité d'eau perdue par évaporation à n'importe quel instant donné.

10.2.2 Mesures effectuées au moyen des atmomètres

Bien que fréquemment considérées comme une mesure relative de l'évaporation à partir de la surface des plantes, les indications des atmomètres n'ont en réalité qu'un rapport lointain avec l'évaporation effective qui s'effectue à partir des surfaces naturelles.

On a exploité avec un certain succès, après être parvenu à établir entre elles des corrélations locales, les mesures effectuées au moyen d'évaporomètres de Piche, dont les expositions à l'ombre avaient été soigneusement uniformisées, pour calculer le facteur aérodynamique (résultant de la multiplication d'une fonction relative au vent et du déficit de tension de vapeur saturante) nécessaire à l'estimation de l'évaporation, par exemple au moyen de la méthode combinatoire de Penman.

S'il est envisageable d'établir empiriquement un rapport entre la perte en eau d'un atmomètre et celle d'une surface naturelle, on peut s'attendre à obtenir une relation différente pour chaque type de surface et pour des conditions climatiques dissemblables. Les atmomètres devraient garder toute leur utilité pour les études à petite échelle, grâce en particulier à leur taille réduite, à leur faible coût et à leur consommation d'eau minime. Il est ainsi possible d'installer des réseaux denses d'atmomètres sur de faibles superficies aux fins d'études micrométéorologiques. Par contre, il est déconseillé d'employer ces instruments pour évaluer les ressources en eau si l'on dispose d'autres données.

10.2.3 Sources d'erreur propres aux atmomètres

Pour que les atmomètres puissent fonctionner convenablement, il est impératif que leurs surfaces évaporantes restent propres. En effet, la présence de saleté sur ces surfaces influe grandement sur le taux d'évaporation, à peu près au même titre qu'un réservoir de thermomètre mouillé en psychrométrie.

De plus, les différences d'exposition exercent souvent un effet considérable sur les mesures de l'évaporation. Cela concerne particulièrement l'exposition aux mouvements d'air autour de la surface évaporante lorsque l'instrument est placé à l'ombre.

10.3 BACS ET BASSINS D'ÉVAPORATION

Il existe un grand nombre de bacs et de bassins d'évaporation de formes, de dimensions et de modes d'exposition différents. Parmi les divers types de bacs et

de bassins disponibles, le bac américain de classe A, le bac russe GGI-3000 et le bassin russe de 20 m² sont décrits ci-après. Ces équipements sont de nos jours largement utilisés comme évaporomètres standard dans les réseaux d'observation, et leurs caractéristiques de fonctionnement ont été étudiées dans des conditions climatiques variées et à diverses latitudes et altitudes. Les données qu'ils permettent d'obtenir sont en rapport stable, quoique complexe et subordonné au zonage climatique, avec les éléments météorologiques régissant l'évaporation, pour peu qu'on applique scrupuleusement les instructions concernant leur installation et leur exposition.

L'adoption du bassin russe de 20 m² comme évaporomètre de référence au plan international a été recommandée.

10.3.1 Bac américain de classe A

Le bac américain de classe A est constitué par un cylindre de 25,4 cm de profondeur et 120,7 cm de diamètre. Il s'installe à une hauteur de trois à cinq centimètres au-dessus du sol, sur un caillebotis en bois. Ainsi, l'air peut circuler librement sous le bac, l'eau qui s'accumule sur le sol en cas de pluie ne risque pas d'atteindre le fond du bac et ce dernier peut être inspecté sans difficulté. Le bac proprement dit est en tôle galvanisée de 0,8 mm d'épaisseur, en cuivre ou en monel, et n'est généralement pas peint. On le remplit d'eau jusqu'à cinq centimètres du bord (ce qu'on appelle le niveau de référence).

Le niveau de l'eau se mesure à l'aide d'une jauge à crochet ou à point fixe. La jauge à crochet est constituée d'une échelle mobile et d'un vernier muni d'un crochet, dont la pointe effleure la surface de l'eau quand l'instrument est bien réglé. Un puits de mesure d'environ 10 cm de diamètre et 30 cm de hauteur, comportant un petit trou à sa partie inférieure, amortit les ondulations qui peuvent se former dans le bac et sert également de support à la jauge à crochet pendant les observations. On remplit le bac lorsque la jauge indique que le niveau de l'eau a baissé de plus de 2,5 cm par rapport au niveau de référence.

10.3.2 Bac russe GGI-3000

De forme cylindrique avec un fond en cône, le bac soviétique GGI-3000 a une surface de 3000 cm² et une profondeur de 60 cm. On l'enterre en laissant son bord dépasser de 7,5 cm la surface du sol. Au centre du bac se trouve un tube métallique repère sur lequel on fixe une burette volumétrique pour procéder aux observations de l'évaporation. La burette est munie d'un robinet qu'on ouvre jusqu'à ce que l'eau qu'elle contient soit au même niveau que

l'eau présente dans le bac. On ferme alors le robinet et on mesure avec exactitude le volume d'eau contenu dans la burette. Connaissant les dimensions de la burette, on détermine alors la hauteur de l'eau au-dessus du tube métallique repère à partir de ce volume. Un pointeau fixé au tube repère indique la hauteur à laquelle le niveau de l'eau du bac doit être maintenu. Ce niveau ne doit pas descendre de plus de 5 mm au-dessous du pointeau, ni s'élever à plus de 10 mm au-dessus. On installe habituellement, à côté du bac GGI-3000, un pluviomètre GGI-3000 dont le collecteur a une surface de 3 000 cm².

10.3.3 Bassin russe de 20 m²

De forme cylindrique et à fond plat, ce bassin a une surface de 20 m², un diamètre d'environ 5 m et une profondeur de 2 m. Construit en tôles soudées de 4 à 5 mm d'épaisseur, on l'enterre en laissant son bord dépasser de 7,5 cm la surface du sol. L'intérieur du bassin et ses surfaces externes exposées à l'air sont peints en blanc. Il est équipé d'un réservoir de remplissage et d'un puits de mesure où se trouve un tube repère sur lequel on place la burette volumétrique pour mesurer le niveau de l'eau contenue dans le bassin. À l'intérieur du puits de mesure, à côté du tube, une petite tige à bout pointu indique la hauteur à laquelle le niveau de l'eau doit être maintenu. Ce niveau ne devrait pas descendre à plus de 5 mm au-dessous de la pointe de la tige, ni s'élever à plus de 10 mm au-dessus. Un tube latéral en verre gradué, fixé au réservoir de remplissage, indique la quantité d'eau qui est ajoutée dans le bassin et permet ainsi de contrôler grossièrement l'indication fournie par la burette.

10.3.4 Mesures effectuées au moyen de bacs et bassins d'évaporation

On obtient le taux d'évaporation à partir d'un bac ou d'un bassin en mesurant la variation du niveau de sa surface d'eau libre. Cela peut se faire à l'aide des dispositifs décrits ci-dessus dans le cas des bacs de classe A et des bacs GGI-3000..

Il existe plusieurs types de bacs d'évaporation automatiques. L'eau y est maintenue à un niveau constant par un dispositif qui déclenche soit un apport d'eau supplémentaire en provenance d'un réservoir auxiliaire, soit une évacuation de l'eau excédentaire apportée par les précipitations. La quantité d'eau ajoutée ou évacuée est enregistrée. Dans d'autres bacs et bassins, le niveau de l'eau est mesuré en permanence par l'intermédiaire d'un flotteur placé dans le puits de mesure et relié à un enregistreur.

Plusieurs techniques d'évaluation de l'évaporation et de l'évapotranspiration à partir de surfaces natu-

relles dont on cherche à estimer les pertes en eau sont fondées sur les mesures effectuées au moyen de bacs d'évaporation. Ces mesures sont d'autant plus intéressantes qu'elles reflètent, dans tous les cas, l'incidence de l'ensemble des paramètres météorologiques et que les données obtenues par ce moyen sont immédiatement disponibles, et cela pour toute période requise. On utilise donc souvent des bacs de ce type pour obtenir des informations concernant l'évaporation sur une base régulière par le biais d'un réseau d'observation.

10.3.5 Exposition des bacs et bassins d'évaporation

Les bacs et bassins d'évaporation sont généralement exposés de trois manières différentes :

- a) enterrés dans le sol; la plus grande partie du bassin se trouve alors au-dessous du niveau du sol, mais la surface évaporante est au même niveau, ou à peu près, que la surface environnante ;
- b) au-dessus du sol; le bac tout entier et la surface évaporante sont alors légèrement surélevés par rapport au sol ;
- c) installés sur des plates-formes fixes flottant sur des lacs ou d'autres plans d'eau.

Les stations d'évaporation devraient se trouver en un emplacement relativement plat et exempt d'obstacles (arbres, bâtiments, arbustes, abris météorologiques, etc.); si de tels obstacles sont néanmoins présents, ils devraient être éloignés d'une distance au moins égale à cinq fois leur hauteur s'ils sont petits, et à dix fois leur hauteur s'il s'agit d'une accumulation d'obstacles. Le terrain devrait être suffisamment vaste pour que les mesures ne soient pas perturbées par d'éventuels embruns ou par les effets de bordure découlant de la présence, au vent, d'une zone cultivée ou se distinguant par toute autre particularité. Ces effets peuvent se faire sentir à plus de 100 mètres. Il convient en outre de clôturer le terrain pour assurer la protection des instruments et empêcher les animaux de venir boire dans le bac. Toutefois, la clôture devrait être construite de manière à ne pas affecter le régime du vent au-dessus du bac.

Il importe de maintenir la couverture végétale du terrain choisi comme emplacement de la station d'évaporation dans un état aussi proche que possible de son état naturel dans la zone environnante. Le gazon, les mauvaises herbes, etc. devraient être fauchés assez souvent pour qu'ils ne dépassent pas le bord des bacs enterrés (soit 7,5 cm de hauteur). Cette limitation à 7,5 cm de la hauteur de l'herbe s'applique d'ailleurs aussi aux bacs de classe A. Il ne faut en aucune circonstance installer ce type d'éva-

poromètre sur un socle en béton, sur de l'asphalte ou sur une couche de pierre concassée, ou encore le placer à l'ombre.

10.3.6 Sources d'erreur propres aux bacs et bassins d'évaporation

Les différents modes d'exposition des bacs d'évaporation, s'ils présentent chacun des avantages, sont également responsables de diverses erreurs de mesure.

Les bacs installés au-dessus du sol sont peu coûteux et faciles à mettre en place et à entretenir. L'eau qu'ils contiennent reste plus propre que celle des bassins enterrés, car elle risque beaucoup moins d'être souillée par des éclaboussements ou de la terre apportée par le vent. Toute fuite éventuelle se produisant après l'installation peut être facilement décelée et réparée. Toutefois, l'eau s'évapore plus rapidement dans ces bacs que dans les bacs enterrés, principalement du fait de l'énergie rayonnante supplémentaire qu'absorbent leurs parois latérales. Il est possible d'éliminer en grande partie les effets parasites du rayonnement sur les parois en utilisant des bacs recouverts de matière isolante, mais cela augmente sensiblement leur prix de revient, contre-vient aux instructions de construction standard et remet en cause la stabilité des relations évoquées à la section 10.3.

Dans le cas des bacs enterrés, les effets de bordure parasites imputables, par exemple, au rayonnement sur les parois latérales ou aux échanges thermiques entre le bac et l'atmosphère sont considérablement atténués. Par contre :

- a) l'eau se souille plus rapidement et le bac est plus difficile à nettoyer ;
- b) la détection et la réparation des fuites soulèvent davantage de difficultés ;
- c) la hauteur de la végétation autour du bac devient un facteur critique. En outre, entre le bac enterré et le sol se produisent des échanges thermiques non négligeables dont l'ampleur dépend d'un grand nombre de facteurs, et notamment de la nature du sol, de sa teneur en eau et de la densité du couvert végétal.

Les bacs flottants donnent une approximation plus juste de l'évaporation qui intervient à la surface d'un lac que des bacs, enterrés ou non, installés sur le rivage, même si ces bacs flottants ont un pouvoir d'accumulation thermique différent des lacs. Ils subissent toutefois l'influence du lac sur lequel ils se trouvent et ne constituent donc pas nécessairement un bon indicateur de l'évaporation qui s'y produit. L'exécution des observations est extrêmement délicate et l'éclaboussement, en particulier, fausse sou-

vent les données. Enfin, l'installation et l'exploitation de ces bacs s'avèrent coûteuses.

Quel que soit le mode d'exposition, il importe d'abord que le bac soit en matériau inoxydable et qu'il soit assemblé de façon à réduire au minimum le risque de fuites.

Les fortes pluies et les vents violents ont tendance à faire rejoaillir l'eau hors des bacs, ce qui peut totalement fausser les mesures.

Le niveau de l'eau dans l'évaporomètre est un facteur important. S'il y a trop d'eau, 10 pour cent (ou plus) de la pluie qui y tombe peut rejoaillir hors du bac, ce qui conduit à surestimer l'évaporation. Si le niveau est trop bas, le taux d'évaporation sera par contre sous-estimé (d'environ 2,5 pour cent par centimètre au-dessous du niveau de référence de 5 cm dans les régions tempérées), du fait que le bord du bac projette trop d'ombre et protège trop bien l'eau qui s'y trouve. Quand on laisse le niveau baisser considérablement, la surface de l'eau se réchauffe davantage et le taux d'évaporation augmente.

Il est conseillé de limiter les fluctuations du niveau de l'eau, soit par des moyens automatiques, soit en réajustant le niveau à chaque lecture, soit encore en enlevant de l'eau lorsque le niveau atteint la limite supérieure fixée ou en rajoutant.

10.3.7 Entretien des bacs et bassins d'évaporation

Il convient d'effectuer des inspections au moins une fois par mois, en accordant une attention particulière à la détection des fuites. Le bac devrait être nettoyé aussi souvent qu'il est nécessaire, afin d'éviter l'accumulation de détritus, le dépôt de sédiments ainsi que la formation d'écume et de pellicules d'huile. Il est recommandé de verser dans l'eau du bac une petite quantité de sulfate de cuivre ou de tout autre produit susceptible de ralentir la croissance des algues.

En cas de gel, il faut entièrement détacher la glace qui adhère aux parois du bac et mesurer le niveau de l'eau pendant que la glace flotte. Dans la mesure où l'on procède ainsi, le fait qu'une partie de l'eau soit gelée n'a pas de répercussion notable sur le niveau d'eau. Si la glace est trop épaisse pour être brisée, il convient d'ajourner le relevé jusqu'à ce qu'elle puisse l'être; il faut alors déterminer l'évaporation en tenant compte de ce délai.

Il est souvent nécessaire de protéger le bac contre les oiseaux et les petits animaux, surtout dans les régions arides et tropicales. A cet effet, on peut utiliser :

- a) des substances chimiques répulsives. Il faut alors veiller à ce que les produits utilisés ne modifient pas de manière appréciable les caractéristiques de l'eau contenue dans l'évaporomètre;
- b) un grillage fixé au-dessus du bac. Des écrans standard de ce genre sont couramment employés en divers endroits. Ils empêchent les oiseaux et les autres animaux de boire l'eau du bac, mais ils réduisent aussi les pertes par évaporation en interceptant une partie du rayonnement solaire et en atténuant le mouvement de l'air au-dessus de la surface de l'eau. Pour pouvoir évaluer l'erreur liée à l'effet du grillage sur le champ du vent ainsi que les caractéristiques thermiques du bac, il est préférable de comparer les valeurs obtenues au moyen d'un bac protégé avec celles obtenues à l'aide d'un bac ordinaire à des emplacements exempts de toute interférence. Des essais portant sur un écran cylindrique constitué d'un grillage en acier à maille hexagonale de 25 mm de largeur reposant sur un châssis en tiges d'acier de 8 mm de diamètre ont mis en évidence une diminution systématique de 10 pour cent du taux d'évaporation en trois endroits différents sur une période de deux ans.

10.4

ÉVAPOTRANSPIROMÈTRES (LYSIMÈTRES)

Plusieurs types de lysimètres ont été décrits dans les ouvrages techniques spécialisés. Pour plus de précisions sur certains des instruments utilisés dans différents pays, on se reportera aux publications de l'OMM (1966 ; 1994).

Généralement, un lysimètre comprend un récipient intérieur rempli de sol et des parois de retenue ou un récipient extérieur, ainsi que des dispositifs spéciaux servant à mesurer la percolation et les variations de la teneur en eau du sol.

Au plan international, il n'existe pas de lysimètre standard universel pour la mesure de l'évapotranspiration. L'aire de surface de ces instruments varie de 0,05 à plusieurs centaines de mètres carrés et leur profondeur, de 0,1 à 5 m. Selon la méthode de mesure, on peut les classer en lysimètres pondérables ou non. Chacun de ces instruments offre des avantages et des inconvénients, et le choix d'un type particulier de lysimètre dépend du problème à traiter.

Les lysimètres non pondérables (à percolation) ne permettent d'effectuer que des mesures à long terme, à moins qu'il soit possible de mesurer la teneur en

eau du sol par un autre moyen indépendant et sûr. On utilise des lysimètres à percolation de grande superficie pour étudier le bilan hydrique et l'évapotranspiration dans le cas d'un couvert végétal bien développé en hauteur et profondément enraciné (arbres adultes, par exemple). Les modèles plus petits, employés dans le cas d'un sol nu ou encore recouvert d'herbe ou de plantes cultivées, donnent souvent d'excellents résultats pour des applications pratiques dans des conditions d'humidité marquée; ils sont faciles à installer, d'un entretien peu coûteux et s'intègrent donc bien dans les réseaux d'observation.

Les lysimètres pondérables (ou lysimètres-balances), hormis les microlysimètres servant à mesurer l'évaporation à partir du sol, coûtent beaucoup plus cher. Ils présentent cependant l'avantage de fournir des estimations fiables et précises des valeurs à court terme de l'évapotranspiration, pour peu qu'aient été prises les précautions indispensables en matière de conception, d'exploitation et de choix de leur emplacement.

On a mis au point plusieurs techniques de pesée fondées sur divers principes de la mécanique et de l'hydraulique. Les petits lysimètres les plus simples sont habituellement soulevés de leurs socles et placés sur une balance mécanique au moyen de grues mobiles. Il arrive aussi que leur récipient soit installé à titre permanent sur une balance mécanique aux fins d'enregistrement continu. On simplifie considérablement le système de pesée et d'enregistrement en utilisant des cellules dynamométriques équipées de jauge de contrainte d'une résistance électrique variable. Les systèmes hydrauliques de pesée sont fondés sur le principe du déplacement des fluides provoqué par la poussée d'un récipient flottant (on parle en ce cas de lysimètre flottant) ou sur le principe des variations de la pression du liquide qui interviennent dans les cellules dynamométriques hydrauliques.

On recommande d'employer les grands lysimètres permettant pesée et enregistrement pour effectuer des mesures de précision dans les centres de recherche et pour procéder à l'étalonnage et au paramétrage des autres systèmes de mesure de l'évapotranspiration ainsi qu'à la modélisation de ce processus. Les petits modèles de lysimètres pondérables conviennent parfaitement aux installations en réseau. Quant à l'usage des microlysimètres pour mesurer l'évaporation à partir du sol, c'est un phénomène relativement nouveau.

10.4.1 Mesures effectuées au moyen des lysimètres

S'agissant des lysimètres, le taux d'évapotranspiration peut être estimé à l'aide de l'équation générale

du bilan hydrique appliquée à leurs récipients. L'évapotranspiration est égale à la somme des précipitations et de l'irrigation, diminuée de la percolation et de la variation de l'emmagasinement.

Par conséquent, les programmes d'observation menés sur des parcelles où sont installés des lysimètres portent sur les précipitations et l'irrigation, la percolation et la variation de l'emmagasinement dans le sol. Il est judicieux de compléter ces programmes par des observations de la croissance et du développement des plantes..

Il est préférable de mesurer les précipitations (et éventuellement l'irrigation) au niveau du sol par des méthodes classiques. L'eau de percolation est recueillie dans un bassin et son volume peut être mesuré à intervalles réguliers ou enregistré. Pour évaluer avec exactitude la variation de l'emmagasinement, on emploie les rigoureuses techniques gravimétriques décrites précédemment. Lors de la pesée, il convient de protéger le lysimètre des effets de la charge exercée par le vent.

La méthode volumétrique donne de bons résultats lorsqu'il s'agit d'évaluer l'évolution à long terme de l'évapotranspiration. Elle permet de mesurer l'intensité des précipitations et de la percolation. On prend pour hypothèse que la variation de l'emmagasinement tend vers zéro durant la période d'observation. Il est en outre possible de déterminer la variation de la teneur en eau du sol en rapportant l'humidité présente dans le sol au pouvoir de rétention de ce dernier au début et à la fin de cette période..

10.4.2 Exposition des évapotranspiromètres

Pour que les taux d'évapotranspiration mesurés soient représentatifs, il importe que le sol et le couvert végétal du lysimètre soient identiques à ceux de la zone environnante et que les perturbations engendrées par la présence de l'instrument soient réduites au minimum (OMM, 2003). On trouvera ci-après les principales exigences en matière d'exposition des lysimètres.

Pour préserver les propriétés hydromécaniques du sol, il est recommandé de le mettre en place d'un seul bloc (monolithique) dans le récipient. Lorsque le sol est léger et manque d'homogénéité et que le récipient est de grande dimension, il suffit de remplir ce dernier couche par couche dans le même ordre et avec la même densité que dans le profil pédologique naturel.

Pour simuler le drainage naturel, il faut veiller à ce que ce processus s'effectue librement dans le fond du récipient. La texture du sol oblige parfois à recourir

à une pompe à vide pour y assurer artificiellement l'aspiration requise.

À l'exception des microlysimètres servant à mesurer l'évaporation à partir du sol, les lysimètres doivent être suffisamment vastes et profonds, et leur bord suffisamment bas, pour que le couvert végétal y pousse librement et de façon représentative.

En général, le choix de l'emplacement des lysimètres est tributaire des mêmes exigences concernant le fetch que les bacs d'évaporation (les instruments doivent être installés en dehors de la zone d'influence des bâtiments, des arbres isolés, des autres instruments météorologiques, etc.). Pour réduire au minimum les effets de l'advection, il convient de placer les lysimètres à une distance suffisante (c'est-à-dire à au moins 100 à 150 m) de la bordure au vent de la zone environnante. L'atténuation des effets de l'advection est particulièrement cruciale lorsqu'il s'agit d'effectuer des mesures à la surface de terres irriguées.

10.4.3 Sources d'erreur propres aux lysimètres

Les mesures effectuées au moyen de lysimètres sont sujettes à diverses erreurs liées aux perturbations des conditions naturelles imputables aux instruments eux-mêmes. Parmi les principales sources d'erreur, on peut mentionner :

- la limitation de la croissance du système racinaire ;
- la modification de la diffusion turbulente résultant de la discontinuité du couvert forestier entre l'intérieur du lysimètre et la zone environnante (cette discontinuité peut correspondre au cercle délimité par le récipient et les parois de retenue du lysimètre ou être la conséquence des disparités du couvert forestier lui-même) ;
- le déséquilibre thermique entre le lysimètre et la zone environnante, engendré par :
 - l'isolation thermique de l'instrument par rapport au sous-sol ;
 - les effets thermiques de l'air ascendant ou descendant qui circule entre le récipient et les parois de retenue ;
 - la modification des propriétés thermiques du sol, due au changement de sa texture et de sa teneur en eau ;
- la concordance insuffisante des bilans hydriques relatifs à l'instrument et à la zone environnante, imputable :
 - à la perturbation du profil pédologique ;
 - au mauvais drainage ;
 - au suintement vertical le long des parois ;
 - à l'interruption du ruissellement et des mouvements latéraux de l'eau dans le sol.

Certaines dispositions permettent de réduire les erreurs dont sont entachées les mesures obtenues au moyen de lysimètres, comme l'ajustement de la température sous le récipient ou l'installation de colliers à bride en vue d'atténuer le suintement vertical au niveau des parois. Outre qu'il faut apporter grand soin à la conception des lysimètres, il importe également de s'assurer de la bonne représentativité des diverses plantes et du sol utilisés pour étudier une zone donnée. De plus, le terrain où est installé le lysimètre doit être parfaitement représentatif du milieu naturel environnant.

10.4.4 Entretien des lysimètres

Il est indispensable de prendre un certain nombre de dispositions pour préserver la représentativité du couvert végétal qui se trouve à l'intérieur des lysimètres. Toutes les activités agricoles ou autres (ensemencement, fumure, fauchage, etc.) doivent être accomplies de la même façon et au même moment dans le récipient et dans la zone environnante. Pour éviter les erreurs dues à des anomalies de la répartition des précipitations, il faut maintenir les plantes proches ou se trouvant à l'intérieur du récipient en position verticale et faire en sorte que les feuilles et les tiges cassées ne retombent pas à la surface du lysimètre.

L'entretien des dispositifs techniques varie selon le type d'instrument et ne peut donc être décrit ici.

Il est recommandé de s'assurer au moins une fois par an que les lysimètres ne fuient pas en recouvrant leur surface pour empêcher l'évapotranspiration et en vérifiant sur une période de quelques jours si la quantité d'eau drainée est égale à la quantité d'eau ajoutée en surface.

10.5 ESTIMATION DE L'ÉVAPORATION À PARTIR DE SURFACES NATURELLES

L'examen des facteurs qui influent sur l'évaporation (voir section 10.1.3) révèle que le taux d'évaporation à partir d'une surface naturelle diffère nécessairement du taux calculé au moyen d'un évaporomètre exposé aux mêmes conditions atmosphériques du fait de la disparité des propriétés physiques des deux surfaces évaporantes.

En pratique, les taux d'évaporation et d'évapotranspiration à partir de surfaces naturelles présentent beaucoup d'intérêt, qu'il s'agisse de l'évaporation des réservoirs ou des lacs, de l'évaporation à partir des cultures ou encore de l'évaporation surfacique à partir de vastes étendues telles que les bassins versants.

Il est en particulier très difficile d'obtenir des estimations surfaciques exactes de l'évapotranspiration à partir de régions présentant des caractéristiques de surface et des modes d'utilisation des sols différents (OMM, 1966; 1997).

Les méthodes qui conviennent le mieux à l'estimation de l'évaporation des lacs ou des réservoirs sont le bilan hydrique, le bilan énergétique, les approches aérodynamiques, la méthode combinant équations aérodynamiques et équations du bilan énergétique ainsi que l'utilisation d'une relation de complémentarité entre l'évaporation réelle et l'évaporation potentielle. On dispose en outre des techniques d'évaporation à partir d'un bac, qui permettent de déterminer un coefficient lac-bac. Ce coefficient varie selon le type de bac et son mode d'exposition; il est en outre fonction des conditions climatiques (voir OMM, 1985; 1994 (chapitre 37)).

On peut obtenir des valeurs ponctuelles ou surfaciques de l'évapotranspiration à partir de surfaces couvertes de végétation en évaluant l'évapotranspiration potentielle (ou évapotranspiration des cultures de référence) à l'aide des méthodes employées dans le cas des lacs, après adaptation aux conditions propres à un couvert végétal. Certaines méthodes ont recours, pour chaque type de végétation (telle ou telle culture, par exemple), à des coefficients qui varient selon le stade de croissance et/ou à une valeur intégrée de la résistance stomatique relative à cette végétation dans son ensemble.

L'Institut météorologique royal des Pays-Bas applique la procédure mise au point par G.F. Makkink (Hooghart, 1971) pour calculer l'évaporation quotidienne (24 h) de référence de la végétation à partir de la température quotidienne moyenne de l'air et de la valeur quotidienne du rayonnement global, à savoir :

- Pression de vapeur saturante à la température de l'air T :

$$e_s(T) = 6.107 \cdot 10^{\frac{T}{237.3+T}} \quad \text{hPa}$$

- Pente de la courbe de la pression de vapeur d'eau saturante par rapport à la température T :

$$\Delta(T) = \frac{7.5 \cdot 237.3}{(237.3 + T)^2} \cdot \ln(10) \cdot e_s(T) \quad \text{hPa}/^\circ\text{C}$$

- Constante psychrométrique :

$$\Delta(T) = 0.646 + 0.0006T \quad \text{hPa}/^\circ\text{C}$$

- Chaleur spécifique de l'évaporation de l'eau :

$$\lambda(T) = 1\,000 \cdot (2\,501 - 2.38 \cdot T) \quad \text{J/kg}$$

- Masse spécifique de l'eau :

$$\rho = 1\,000 \quad \text{kg/m}^3$$

- Rayonnement global (valeur cumulée 24 h) :

$$Q \quad \text{J/m}^2$$

- Température de l'air (moyenne 24 h) :

$$T \quad {}^\circ\text{C}$$

- Évaporation quotidienne de référence de la végétation :

$$E_r = \frac{1\,000 \cdot 0,65 \cdot \delta(T)}{\{\delta(T) + \gamma(T)\} \cdot \rho \cdot \lambda(T)} \cdot Q \quad \text{mm}$$

- Nota :* La constante 1 000 sert à convertir les mètres en millimètres; la constante 0,65 est une constante empirique type.

En établissant une relation entre le taux mesuré d'évapotranspiration réelle et des estimations du taux d'évapotranspiration potentielle, puis en reliant la valeur normalisée ainsi obtenue à la teneur en eau, au déficit hydrique ou au potentiel hydrique du sol dans la zone des racines, il est possible d'obtenir des coefficients qui permettent de calculer le taux d'évapotranspiration réelle pour un sol ayant une teneur en eau donnée.

On parvient à estimer plus directement des valeurs ponctuelles de l'évapotranspiration réelle à partir du sol en observant, par le biais d'échantillonnages réguliers, les variations de la teneur en eau du sol, ou encore à mesurer cette évapotranspiration avec plus d'exactitude à l'aide d'un lysimètre-balance. D'autres méthodes sont fondées sur des mesures de la turbulence (corrélation du flux turbulent, par exemple) ou du profil (méthodes d'observation dans la couche limite et, à deux hauteurs, méthode du bilan énergétique fondée sur le rapport de Bowen). Ces méthodes sont beaucoup plus coûteuses et nécessitent des instruments et capteurs spéciaux pour mesurer l'humidité, la vitesse du vent et la température. Les estimations obtenues, valables pour les types de

sol et de couvert forestier étudiés, peuvent être utilisées comme valeurs de référence indépendantes en vue de l'élaboration de relations empiriques pour la modélisation de l'évapotranspiration.

Les difficultés que soulève l'évaluation de l'évapotranspiration au niveau des bassins versants sont dues à la disparité des caractéristiques de surface, qui occasionne un taux d'évapotranspiration variable au sein de la zone étudiée. Lorsqu'on souhaite obtenir des valeurs à court terme, il est indispensable de se fonder sur des relations empiriques pour estimer l'évapotranspiration. Si l'on mène une étude sur une période de temps plus longue (de façon à réduire au minimum les effets de l'emmagasinement), on peut employer la méthode du bilan hydrique pour évaluer l'évapotranspiration au niveau des bassins (voir OMM, 1971). Une approche appropriée aux estimations sur de vastes étendues consiste dans la méthode fondée sur le bilan hydrique de l'atmosphère, qui permet de déduire le taux d'évapotranspiration surfacique de données de radiosondage. Pour plus de précisions sur ces méthodes, les avantages qu'elles présentent et leurs limites d'application, on se reportera à la publication de l'OMM (1994, chapitre 38).

Il est difficile de mesurer l'évaporation à partir d'une couche de neige, et les résultats ne sont probablement pas plus exacts que ceux qu'on peut obtenir par le calcul de l'évaporation de l'eau.

Pour mesurer l'évaporation à partir d'une couche de neige, on utilise dans de nombreux pays des évapromètres en polyéthylène ou en plastique incolore, les observations n'étant faites qu'en l'absence de chute de neige.

On peut estimer l'évaporation à partir d'une couche de neige en utilisant l'équation de la diffusion turbulente et en se fondant sur les observations de l'humidité de l'air et de la vitesse du vent mesurées à la surface de la couche de neige et à un ou deux niveaux au-dessus de cette couche. Ces estimations sont plus sûres lorsque les valeurs de l'évaporation sont calculées pour des périodes de cinq jours ou plus.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Hooghart, J.C. (ed.), 1971 : *Evaporation and Weather*. TNO Committee of Hydrological Research, Technical Meeting 44, Proceedings and Information No. 39, TNO, La Haye.
- Organisation météorologique mondiale, 1966 : *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration*. Note technique N° 83, OMM-N° 201, TP.105, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1971 : *Problems of Evaporation Assessment in the Water Balance* (C.E. Hounam). Rapport N° 13 de l'OMM/DHI, OMM-N° 285, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1973 : *Atmospheric Vapour Flux Computations for Hydrological Purposes* (J. P. Peixoto). Rapport N° 20 de l'OMM/DHI, OMM-N° 357, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1976 : *The CIMO International Evaporimeter Comparisons*. OMM-N° 449, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1977 : *Hydrological Application of Atmospheric Vapour-Flux Analyses* (E.M. Rasmusson). Rapport d'hydrologie opérationnelle N° 11, OMM-N° 476, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1985 : *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation*. Rapport d'hydrologie opérationnelle N° 22, OMM-N° 635, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Vocabulaire météorologique mondial*. Deuxième édition, OMM-N° 182, Genève.
- Organisation météorologique mondiale/Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 1992 : *Glossaire international d'hydrologie*. OMM-N° 385, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1994 : *Guide des pratiques hydrologiques*. (5^e édition), OMM-N° 168, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1997 : *Estimation of Areal Evapotranspiration*. Rapport technique sur l'hydrologie et les ressources en eau N° 56, OMM/TD-No. 785, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel du Système mondial d'observation*. Volume I, OMM-N° 544, Genève.

CHAPITRE 11

MESURE DE L'HUMIDITÉ DU SOL

11.1 GÉNÉRALITÉS

L'humidité du sol est une variable primordiale du cycle de l'eau, à la fois à petite échelle (exploitation agricole) et à grande échelle (modélisation des interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère). Les végétaux et les cultures sont davantage tributaires de l'humidité disponible au niveau des racines que des précipitations. L'information sur l'humidité du sol à l'échelle locale est essentielle pour établir un bilan hydrique ou un calendrier d'irrigation. Des connaissances précises sur le degré d'humidité du sol aident à prévoir les risques de crue éclair ou les épisodes de brouillard.

L'humidité du sol a toutefois rarement été observée de manière régulière aux stations météorologiques. La documentation relative à l'humidité du sol se limitait généralement à la description de l'«état du sol» dans les tables de code de l'OMM 0901 et 0975, et la réalisation des mesures était laissée aux bons soins des hydrologues, agronomes et autres parties activement concernées. Au tournant des années 1990, les météorologues ont commencé à montrer plus d'intérêt vis-à-vis de cette activité. Ce nouvel engouement était en partie attribuable au fait qu'après les travaux de précurseur effectués par Deardorff (1978), les modèles numériques de l'atmosphère à diverses échelles nécessitaient de plus en plus de données sur les flux de chaleur latente et sensible dans les couches superficielles du sol. Par ailleurs, les techniques de mesure récemment mises au point sont plus faciles à appliquer aux stations météorologiques que la plupart des méthodes classiques.

Afin de satisfaire les besoins croissants en ce qui a trait à l'établissement de l'état de l'humidité du sol, on examinera ici les techniques et les instruments les plus couramment employés, avec leurs avantages et leurs inconvénients. Certaines méthodes d'observation moins courantes seront également mentionnées.

11.1.1 Définitions

Pour déterminer l'humidité du sol, on mesure généralement soit la teneur en eau du sol, soit le potentiel hydrique du sol.

Teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol est une expression de la masse ou du volume de l'eau présente dans le sol, alors

que le potentiel hydrique du sol est une expression de l'état énergétique de l'eau du sol. La relation existante entre ces deux mesures n'est pas universelle et est conditionnée par les propriétés du sol à l'échelle locale, comme la masse volumique du sol et sa texture. La teneur en eau du sol, sur la base de la masse, est exprimée en degré d'humidité gravimétrique du sol, θ_g , par la formule :

$$\theta_g = M_{\text{water}} / M_{\text{soil}} \quad (11.1)$$

où M_{water} est la masse d'eau dans l'échantillon de sol et M_{soil} est la masse de sol séché contenu dans l'échantillon. En météorologie, les valeurs de θ_g sont habituellement exprimées en pour cent.

Étant donné que les variables de précipitation, d'évapotranspiration et de transport de solutés sont couramment exprimées en termes de flux, les expressions volumiques de la teneur en eau sont souvent plus utiles. L'humidité volumique d'un échantillon de sol, θ_v , est déterminée par la formule :

$$\theta_v = V_{\text{water}} / V_{\text{sample}} \quad (11.2)$$

où V_{water} est le volume d'eau dans l'échantillon de sol et V_{sample} est le volume total de sol séché + d'air + d'eau dans l'échantillon. Encore une fois, le rapport est généralement exprimé en pour cent. La relation entre l'humidité gravimétrique et l'humidité volumique se définit ainsi :

$$\theta_v = \theta_g (\rho_b / \rho_w) \quad (11.3)$$

où ρ_b est la masse volumique apparente du sol sec et ρ_w la masse volumique de l'eau du sol.

La technique fondamentale de mesure de la teneur en eau du sol est la méthode gravimétrique, qui est décrite ci-après à la section 11.2. Elle sert de comparaison et de référence pour toutes les autres procédures parce qu'elle est basée sur des mesures directes. Malheureusement, l'échantillonnage gravimétrique est destructif, ce qui rend impossible la répétition de mesures sur le même échantillon. Vu la difficulté de mesurer avec exactitude les volumes d'eau et de sol séché, on ne détermine généralement pas directement l'humidité volumique.

Potentiel hydrique du sol

Le potentiel hydrique du sol, qui décrit l'état énergétique de l'eau dans le sol, est une propriété im-

portante pour l'analyse de l'écoulement de l'eau, les estimations de stockage de l'eau et les relations sol plante eau. Une différence de potentiel hydrique entre deux emplacements indique la tendance de l'eau à s'écouler, du fort potentiel vers un potentiel moindre. Lorsque le sol s'assèche, la valeur négative du potentiel hydrique s'accroît, ce qui rend plus difficile l'extraction de l'eau par les plantes. Ce phénomène peut se traduire par un stress chez les végétaux et, dans les cas extrêmes, par un flétrissement aigu.

Par définition, le potentiel hydrique représente la capacité qu'a l'eau du sol de fournir un travail ou, dans le cas d'un potentiel négatif, le travail nécessaire pour extraire l'eau du sol. Le potentiel hydrique total, ψ_t , (effet combiné de tous les champs de force) peut s'exprimer par la formule :

$$\psi_t = \psi_z + \psi_m + \psi_o + \psi_p \quad (11.4)$$

dans laquelle ψ_z est le potentiel gravitationnel, fondé sur l'altitude au-dessus du niveau moyen de la mer; m le potentiel matriciel, succion attribuable à l'attraction de l'eau par la matrice du sol; o le potentiel osmotique, dû aux effets énergétiques des solutés dans l'eau; et p le potentiel de pression, c'est-à-dire la pression hydrostatique sous une surface d'eau.

Parmi ces potentiels, ceux qui ne sont pas liés à la composition de l'eau ou du sol, forment ce que l'on appelle le potentiel hydraulique, ψ_h . Dans un sol saturé, il s'exprime comme suit $\psi_h = \psi_z + \psi_p$, et ainsi $\psi_h = \psi_z + \psi_m$, dans un sol non saturé. Lorsque l'expression «potentiel hydrique» est utilisée dans des études, éventuellement avec le symbole ψ_w , il convient de vérifier la définition qu'en donne l'auteur car ce terme peut être employé pour désigner $\psi_m + \psi_z$ ou $\psi_m + \psi_o$.

Les gradients des différents potentiels peuvent ne pas toujours être efficaces pour provoquer l'écoulement. Par exemple, ψ_o nécessite une membrane semi-perméable pour induire l'écoulement, et ψ_p existera dans des conditions de saturation ou de submersion, mais la plupart des applications pratiques ont lieu dans un sol non saturé.

11.1.2 Unités

Pour résoudre les équations de bilan massique ou de continuité appliquées à l'eau, il faut se rappeler que les composantes des paramètres de teneur en eau ne sont pas adimensionnelles. La teneur en eau gravimétrique indique la masse d'eau contenue dans une unité de masse de sol (kg d'eau/kg de sol sec). De même, la teneur en eau volumique indique une fraction de volume (m^3 d'eau/ m^3 de sol).

L'unité fondamentale utilisée pour exprimer le potentiel hydrique est l'énergie (en joules, $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$) par unité de masse, J kg^{-1} . Ou bien, l'énergie par unité de volume (J m^{-3}) est équivalente à la pression, exprimée en pascals ($\text{Pa} = \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$). Les unités couramment utilisées dans les ouvrages anciens sont le bar (= 100 kPa), l'atmosphère (= 101,32 kPa) ou la livre par pouce carré (= 6,895 kPa). Une troisième catégorie d'unités est la hauteur piézométrique en (centi)mètres d'eau ou de mercure, énergie par unité de masse. La relation des trois catégories d'unité est la suivante :

$$\psi (\text{J kg}^{-1}) = \gamma \times \psi (\text{Pa}) = [\psi (\text{m})] / g \quad (11.5)$$

où $\gamma = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ (masse volumique de l'eau) et $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ (accélération de la pesanteur). Étant donné la plage étendue des valeurs du potentiel hydrique du sol, celui-ci est souvent exprimé sous forme logarithmique, habituellement en hauteur piézométrique de l'eau. Une unité employée couramment est le pF, qui correspond au logarithme de base 10 de la valeur absolue de la hauteur d'eau, exprimée en centimètres.

11.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Le sol est composé de particules individuelles et d'agrégats de matières minérales et organiques, entre lesquels on retrouve des espaces ou pores occupés par de l'eau et de l'air. Le volume relatif de pores diminue lorsque la taille des grains du sol augmente (cela peut paraître contre-intuitif). La circulation de l'eau liquide dans le sol est conditionnée par la taille, la forme et, généralement, la géométrie de ces espaces poreux.

Si une grande quantité d'eau est ajoutée à un bloc de sol «sec», une partie sera drainée rapidement par effet de gravité en passant par des fissures et des passages de taille relativement grande. Le reste aura tendance à déplacer une partie de l'air se trouvant dans les espaces entre les particules, à commencer par les espaces poreux les plus étendus. De manière générale, un «front d'humectation» bien défini s'infiltre dans le sol en laissant une couche de plus en plus épaisse de sol retenant toute l'eau qu'elle peut contenir contre l'effet de la gravité. On dit alors que la couche de sol a atteint la «capacité au champ», état qui, pour la plupart des sols, correspond à une valeur approximative de $\psi \approx 10 \text{ kPa}$ ($\text{pF} \approx 2$). Il ne faut pas confondre cet état avec les conditions non souhaitées de sol «saturé», où tous les espaces poreux sont occupés par de l'eau. Après un épisode de saturation, comme une forte pluie, le sol a généralement besoin d'une période d'au moins 24 heures pour parvenir à la capacité au champ. Lorsque la

teneur en humidité est inférieure à la capacité au champ, l'écoulement d'eau restreint dans le sol qui en résulte est sous forme en partie liquide et en partie gazeuse sous l'action des processus d'évaporation et de condensation (qui dépendent des gradients de température dans le sol), et parfois du transport dans les racines des végétaux.

Les racines se trouvant dans le bloc pourront extraire l'eau liquide des pellicules d'eau autour des particules de sol avec lesquelles elles sont en contact. La vitesse d'extraction est fonction du potentiel hydrique du sol. Le «point de flétrissement permanent» est atteint lorsque la capacité de succion des racines ne peut venir à bout des forces qui retiennent l'humidité autour des particules de sol, laissant les plantes en manque d'eau et en perte de turgescence; dans la plupart des cas, ce point équivaut à un potentiel hydrique du sol de $-1,5 \text{ MPa}$ ($pF = 4,2$). En agriculture, la quantité d'eau contenue dans le sol et disponible pour les plantes correspond généralement à la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, et elle varie fortement selon la texture du sol. Dans un sol sableux, elle peut être inférieure à 10 pour cent en volume, alors que dans un sol renfermant beaucoup de matière organique, elle peut dépasser les 40 pour cent.

Il est habituellement souhaitable de connaître la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol en fonction de la profondeur. Les modèles d'évapotranspiration s'intéressent surtout aux faibles profondeurs (quelques dizaines de centimètres); les applications agricoles nécessitent une information sur l'eau disponible au niveau des racines (environ un mètre); et les modèles de la circulation générale de l'atmosphère englobent un certain nombre de couches jusqu'à une profondeur de quelques mètres. Pour les besoins de l'hydrologie et l'estimation du bilan hydrique, notamment les modèles de ruissellement à l'échelle d'un bassin, ainsi que la détermination des effets sur les propriétés du sol, comme la résistance mécanique, et la conductivité et diffusivité thermiques, il faut disposer de données sur la teneur en eau du sol en profondeur. L'exactitude nécessaire pour établir la teneur en eau et la résolution spatio temporelle à atteindre varient selon l'application. Un problème fréquent est l'hétérogénéité des sols qui fait que les données recueillies à un emplacement spécifique ne peuvent fournir une connaissance absolue de l'humidité des sols de la région, mais seulement une indication relative de son évolution.

11.1.4 Méthodes de mesure

Les méthodes et instruments employés pour évaluer l'état de l'eau dans le sol peuvent être classés de trois manières. Premièrement, il convient de faire une dis-

tinction entre la détermination de la teneur en eau et la détermination du potentiel hydrique. Deuxièmement, la méthode de mesure directe nécessite la disponibilité d'une parcelle de terrain représentative dans laquelle un grand nombre d'échantillons puisse être collecté pour des évaluations destructives en laboratoire. Les mesures indirectes font appel à un instrument placé dans le sol pour mesurer certaines propriétés associées à l'humidité du sol. Troisièmement, on peut regrouper les méthodes selon leur applicabilité opérationnelle, en tenant compte du travail régulier à accomplir, du degré de dépendance vis-à-vis du travail en laboratoire, de la complexité d'utilisation et de la fiabilité des résultats. Il convient, par ailleurs, de comparer les coûts préliminaires d'acquisition des instruments aux coûts ultérieurs liés aux observations régulières sur le terrain et au traitement des données.

Les études, comme celles de l'OMM (1968; 1989; 2001) et de Schmugge, Jackson et McKim (1980) dressent un panorama très utile des problèmes pratiques, mais comme les méthodes de mesure diélectriques ont été mises au point bien après 1980, il ne faut pas donner beaucoup de poids aux études trop anciennes pour le choix d'une méthode.

On dénombre quatre techniques de détermination de la teneur en eau du sol. Il y a d'abord la méthode gravimétrique classique, directe et simple. On peut aussi avoir recours à des lysimètres, une variante non destructive de la méthode gravimétrique. Cette méthode consiste à peser, continuellement ou occasionnellement, un bac rempli de sol afin de déceler les variations de sa masse totale qui peuvent être dues, partiellement ou totalement, aux fluctuations de l'humidité du sol (le chapitre 10 de la Partie I de ce Guide contient de plus amples informations sur les lysimètres). Soulignons également l'approche indirecte au moyen de diverses techniques radiologiques, notamment par diffusion des neutrons ou absorption du rayonnement gamma. Il est enfin possible de dériver la teneur en eau des propriétés diélectriques du sol, en recourant, par exemple, à la réflectométrie dans le domaine temporel.

Pour mesurer le potentiel hydrique du sol, on peut faire appel à plusieurs méthodes indirectes, en particulier les tensiomètres, les blocs à résistance électrique et les psychromètres. À l'heure actuelle, aucun de ces instruments ne peut couvrir la plage complète des valeurs possibles du potentiel hydrique. Pour une revue approfondie de toutes les méthodes de mesure de l'humidité du sol, on se reportera aux guides actualisées de Klute (1986), Dirksen (1999), et Smith et Mullins (Gardner et al, 2001, et Mullins, 2001, dans la bibliographie du présent chapitre).

11.2 MESURE GRAVIMÉTRIQUE DIRECTE DE LA TENEUR EN EAU DU SOL

La teneur en eau gravimétrique, θ_g , est généralement déterminée directement. Des échantillons de sol d'environ 50 g sont prélevés sur le terrain à l'aide des meilleurs outils possibles (pelles, tarières hélicoïdales à main, tarières à godet, éventuellement carottiers mécaniques), en prenant soin de perturber au minimum la structure de l'échantillon (Dirksen, 1999). Chaque échantillon doit être placé immédiatement dans un conteneur étanche sans soudure, pré-pesé et identifié. Comme les échantillons sont mis dans un four, le conteneur doit pouvoir résister à des températures élevées sans fondre ni perdre beaucoup de masse. Les conteneurs pour sol les plus couramment utilisés sont des boîtes d'aluminium, mais l'on doit avoir recours à des conteneurs non métalliques si les échantillons sont séchés à l'intérieur de fours à micro ondes dans le laboratoire. Si les échantillons doivent être transportés sur une grande distance, il convient de les sceller à l'aide de ruban pour éviter la perte d'humidité par évaporation.

Les échantillons et le conteneur sont pesés au laboratoire, avant et après dessiccation, la différence représentant la masse de l'eau que contenait l'échantillon. L'opération de dessiccation consiste à placer le conteneur ouvert dans une étuve électrique à 105 °C pour ne l'en retirer que lorsque la masse reste constante. Le temps nécessaire varie de 16 à 24 heures. Soulignons que cette opération de dessiccation à 105±5 °C fait partie de la définition généralement acceptée de la «teneur en eau du sol», compte tenu de l'objectif de ne mesurer que la teneur en eau «libre» non fixée à la matrice du sol (Gardner et al., 2001).

Si les échantillons de sol contiennent une quantité importante de matière organique, une oxydation excessive peut se produire à 105 °C avec perte d'une partie de la matière organique. Bien qu'il soit difficile de préciser la température spécifique à laquelle a lieu cette oxydation, il semblerait que le fait d'abaisser la température de l'étuve de 105 à 70 °C suffit pour éviter une perte importante de matière organique, mais les valeurs de teneur en eau risquent d'être trop faibles. Les températures d'étuve et les temps de dessiccation doivent être vérifiés et enregistrés.

On peut aussi procéder à la dessiccation au four à micro-ondes pour déterminer la teneur en eau gravimétrique, avec de bons résultats (Gee et Dodson, 1981). Avec cette méthode, la température atteint rapidement le point d'ébullition et reste constante pendant un certain temps par suite de l'absorption de chaleur par la vaporisation de l'eau. Toutefois, la température s'élève rapidement dès que l'énergie absorbée par le sol excède l'énergie consommée par la vaporisation

de l'eau. Il faut faire attention car la température peut atteindre le point de fusion des conteneurs en plastique si l'échantillon contient des pierres.

Les mesures gravimétriques de l'eau d'un sol minéral séché à l'air (25 °C) sont d'ordinaire inférieures à 2 pour cent, mais à mesure que le sol approche de la saturation, la teneur en eau peut augmenter jusqu'à des valeurs comprises entre 25 et 60 pour cent, selon le type de sol. La teneur en eau volumique du sol, θ_v , peut aller de moins de 10 pour cent pour un sol séché à l'air, jusqu'à 40 à 50 pour cent pour un sol minéral approchant de la saturation. Pour déterminer cette dernière teneur, il faut mesurer la masse volumique du sol, par exemple en recouvrant une motte de terre de paraffine et en la pesant dans l'air et l'eau, ou en ayant recours à d'autres méthodes (Campbell et Henshall, 2001).

La présence de pierres ou de graviers affecte la mesure de la teneur en eau des sols. Quand les pierres occupent un volume appréciable du sol, elles modifient la mesure directe de la masse du sol, mais ne modifient pas la porosité du sol dans la même proportion. Supposons, par exemple, que l'on obtienne une teneur en eau gravimétrique de 10 pour cent pour un échantillon de sol ayant une masse volumique apparente de 2 000 kg m⁻³; dans ce même échantillon, la fraction fine du sol (sans pierres ni gravier), dont la masse volumique serait de 1 620 kg m⁻³, aurait une teneur en eau égale à 20 pour cent.

Bien que la teneur en eau gravimétrique de la fraction fine du sol, $\theta_{g,fines}$, soit la valeur normalement utilisée pour les comparaisons spatiales et temporelles, il peut y avoir aussi nécessité de déterminer la teneur en eau volumique d'un sol graveleux. Cette dernière valeur peut être importante pour calculer le volume d'eau dans la zone racinaire. La relation entre la teneur en eau volumique de la fraction fine du sol et la teneur en eau volumique apparente est donnée par la formule :

$$\theta_{v,stony} = \theta_{g,fines} (\rho_b / \rho_v)(1 + M_{stones}/M_{fines}) \quad (11.6)$$

dans laquelle $\theta_{v,stony}$ est la teneur en eau volumique apparente d'un sol contenant des pierres ou des graviers et M_{stones} et M_{fines} sont respectivement la masse des pierres et celle de la fraction fine du sol (Klute, 1986).

11.3 MESURE INDIRECTE DE LA TENEUR EN EAU DU SOL

La capacité du sol à retenir l'eau est fonction, entre autres variables, de la texture et de la structure du sol. En prélevant un échantillon du sol, on le per-

turbe et on altère sa capacité de rétention de l'eau. Les méthodes indirectes de mesure de l'eau du sol présentent des avantages : elles permettent notamment de recueillir de l'information au même endroit à chaque observation, sans perturber le système sol eau. De plus, la plupart des méthodes indirectes déterminent la teneur volumique en eau sans qu'il soit nécessaire de déterminer la masse volumique du sol.

11.3.1 Méthodes radiologiques

Pour mesurer la teneur en eau du sol, on a largement recours à deux méthodes radiologiques. L'une d'elles est la méthode de diffusion des neutrons, qui est fondée sur l'interaction des neutrons haute énergie (rapides) et des noyaux d'atomes d'hydrogène contenus dans le sol. L'autre consiste à mesurer l'atténuation des rayons gamma lorsqu'ils traversent le sol. Les deux font appel à de l'équipement portatif à utiliser sur des sites d'observation permanents, qui doit être soigneusement étalonné, de préférence avec le sol dans lequel il va être utilisé.

Il est nécessaire de prendre certaines précautions lorsque l'on utilise des dispositifs à source radioactive. Le fabricant fournit un écran qu'il faut utiliser à tout moment. La sonde ne doit quitter l'écran que lorsqu'on la descend dans le tube d'accès. Quand on respecte les lignes directrices et consignes données par les fabricants et les autorités sanitaires, il n'y a pas lieu de craindre d'être exposé à une irradiation excessive, quelle que soit la fréquence d'utilisation des appareils. L'opérateur devrait néanmoins porter un dosimètre photographique personnel permettant d'évaluer et d'enregistrer mensuellement les niveaux d'exposition.

11.3.1.1 Méthode de diffusion des neutrons

Pour la détection neutronique de l'humidité du sol (Visvalingam et Tandy, 1972; Greacen, 1981), on a recours à une sonde qui émet des neutrons haute énergie (rapides) et à un détecteur de neutrons ralentis, qui sont introduits dans le sol. Les noyaux d'hydrogène ayant à peu près la même masse que les neutrons sont au moins dix fois plus efficaces que la plupart des autres noyaux dans le sol pour ralentir les neutrons par collision. Comme la plus grande partie de l'hydrogène contenu dans le sol se trouve dans les molécules d'eau, la concentration des neutrons lents «thermalisés» au voisinage de la sonde est quasi proportionnelle à la teneur en eau volumique du sol.

Après un certain nombre de collisions, une fraction des neutrons ralentis retourne à la sonde et au détecteur. Lorsque la teneur en eau est importante, peu de neutrons sont capables de franchir une grande dis-

tance avant d'être thermalisés et rendus sans effet; alors, 95 pour cent des neutrons détectés proviennent d'un volume de sol relativement petit. Dans un sol humide, le «rayon d'influence» peut n'être que de 15 cm, alors que dans un sol sec, il peut atteindre les 50 cm. Comme le volume de sol mesuré varie en fonction de la teneur en eau, il est impossible de résoudre des couches minces. Cette méthode n'est par conséquent pas idéale pour localiser les discontinuités de la teneur en eau et ne peut donner de bons résultats dans la couche supérieure de 20 cm du sol, à cause de la discontinuité sol air.

Plusieurs dispositifs source détecteur sont possibles avec une sonde à neutrons, mais la meilleure solution consiste à avoir recours à une sonde dotée d'un détecteur double et d'une source centrale, habituellement dans un conteneur cylindrique. Un tel dispositif permet d'obtenir une zone d'influence quasi sphérique et autorise une relation plus linéaire entre le dénombrement des neutrons et la teneur en eau du sol.

La sonde est reliée par un câble aux circuits électriques centraux, de façon à pouvoir descendre dans un tube d'accès préalablement installé. Le tube d'accès doit être sans soudure et présenter une épaisseur de paroi suffisante (au moins 1,25 mm) pour être rigide, mais pas au point de contribuer significativement au ralentissement des neutrons. Ce tube doit être en matériau résistant à la corrosion, comme l'acier inoxydable, l'aluminium ou certains plastiques, mais il faut éviter le chlorure de polyvinyle car il absorbe les neutrons lents. La sonde doit pouvoir glisser dans le tube sans se coincer, un tube d'un diamètre de 5 cm convenant généralement. Lors de l'installation du tube, il faut veiller à ne laisser aucun vide d'air entre le tube et la matrice de sol. Le tube devrait dépasser d'au moins 10 cm au-dessus de la surface du sol pour recevoir le boîtier électronique à sa partie supérieure. Tous les tubes d'accès devraient comporter un bouchon amovible pour empêcher l'eau de pluie d'y pénétrer.

Pour améliorer la reproductibilité expérimentale, la teneur en eau du sol n'est pas directement comparée au nombre de neutrons lents détectés, mais à un rapport de comptage (CR), défini par la formule suivante :

$$CR = C_{soil}/C_{background} \quad (11.7)$$

où C_{soil} est le compte de neutrons thermalisés détectés dans le sol et $C_{background}$ le compte de neutrons thermalisés détectés sur une plate-forme de référence. Toutes les sondes neutroniques sont livrées maintenant avec une plate-forme de référence aux fins d'étalonnage, généralement en fonction de

l'eau. Cette plate-forme, sur laquelle est placée la sonde, doit avoir un diamètre minimum de 0,5 m, de manière à représenter un milieu «infini». L'étalonnage pour déterminer $C_{background}$ peut être effectué par une série de dix lectures d'une minute, dont on peut faire la moyenne, ou par une seule lecture d'une heure. C_{soil} est établi à partir de la moyenne de plusieurs lectures de sol à une profondeur/emplacement donné. Pour l'étalonnage, il vaut mieux prélever trois échantillons autour du tube d'accès et faire la moyenne des teneurs en eau correspondant au CR moyen calculé pour la profondeur visée. Il faudrait faire un minimum de cinq mesures de teneur en eau pour chaque profondeur. Bien que certaines courbes d'étalonnage puissent se ressembler, il est préférable de procéder à un étalonnage pour chaque profondeur de relevé. La durée de vie de la plupart des sondes est de plus de dix ans.

11.3.1.2 Absorption du rayonnement gamma

Alors que la méthode neutronique permet de mesurer la teneur en eau volumique à l'intérieur d'une grande sphère, la méthode d'absorption du rayonnement gamma est capable d'explorer une couche mince. Le dispositif à double sonde est maintenant surtout utilisé au laboratoire depuis que l'on a recours aux méthodes diélectriques sur le terrain. Cela s'explique également par le fait que les appareils à rayonnement gamma sont plus dangereux à utiliser que les équipements à diffusion de neutrons, et que les coûts d'exploitation associés sont relativement élevés.

Les variations d'atténuation des rayons gamma pour un coefficient d'absorption massique donné peuvent être mises en rapport avec les variations de la masse volumique totale du sol. Comme l'atténuation des rayons gamma est due à la masse, il est impossible de déterminer la teneur en eau à moins de connaître l'atténuation qui correspond à la masse volumique du sol sec local. En outre, la masse volumique du sol sec doit demeurer inchangée quand la teneur en eau varie. Il n'est donc pas aisément de déterminer avec exactitude la teneur en eau du sol à partir de la différence entre les valeurs d'atténuation pour la masse volumique totale et la masse volumique du sol sec.

Contrairement à la méthode neutronique, la méthode du rayonnement gamma autorise des mesures exactes à quelques centimètres au-dessous de l'interface air surface. Même si elle présente une résolution élevée, le petit volume de sol mesuré donne lieu à une plus grande variabilité spatiale, en relation avec l'hétérogénéité du sol (Gardner et Calissendorff, 1967).

11.3.2 Méthodes diélectriques sol eau

Quand un substrat est placé dans le champ électrique d'un condensateur ou d'un guide d'ondes, son

influence sur les forces électriques présentes dans ce champ est exprimée sous la forme du rapport entre les forces dans ce substrat et les forces qui existeraient dans le vide. Ce rapport, appelé permittivité ou «constante diélectrique», est 20 fois plus grand pour l'eau liquide que pour le sol sec moyen, car les molécules d'eau constituent des dipôles permanents. Les propriétés diélectriques de la glace et de l'eau fixée à la matrice de sol sont comparables à celles d'un sol sec. On peut donc déterminer la teneur volumétrique de l'eau libre dans le sol à partir des caractéristiques diélectriques du sol humide au moyen de méthodes de mesure fiables, rapides et non destructives, sans les risques potentiels associés aux dispositifs à source radioactive. Par ailleurs, ces méthodes diélectriques peuvent être entièrement automatisées pour l'acquisition des données. Pour le moment, deux méthodes d'évaluation des propriétés diélectriques de l'eau dans le sol sont disponibles et fréquemment utilisées, à savoir la rélectométrie dans le domaine temporel et les mesures dans le domaine fréquentiel

11.3.2.1 Rélectométrie dans le domaine temporel

La rélectométrie dans le domaine temporel est une méthode qui détermine la constante diélectrique du sol en suivant le déplacement d'une impulsion électromagnétique, transmise le long d'un guide d'ondes formé par une paire de tiges parallèles enfouies dans le sol. Cette impulsion est réfléchie à l'extrémité du guide d'ondes et sa vitesse de propagation, qui est inversement proportionnelle à la racine carrée de la constante diélectrique, peut être correctement mesurée grâce aux dispositifs électroniques modernes.

La relation la plus couramment utilisée entre les propriétés diélectriques du sol et la teneur en eau du sol a été exprimée expérimentalement par Topp, Davis et Annan (1980) de la façon suivante :

$$\theta_v = -0.053 + 0.029 \epsilon - 5.5 \cdot 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \epsilon^3 \quad (11.8)$$

où ϵ est la constante diélectrique du système sol eau. Cette relation empirique s'est avérée applicable à de nombreux types de sols, quelles que soient, dans la plupart des cas, leur texture et leur teneur en gravier (Drungil, Abt et Gish, 1989). Il est toutefois souhaitable de procéder à un étalonnage lorsque le sol présente une masse volumique faible ou une teneur élevée en matières organiques. Pour les mélanges complexes de sol, l'équation De Loor s'est révélée utile (Dirksen et Dasberg, 1993).

Généralement, les tiges parallèles sont séparées de 5 cm et leur longueur varie de 10 à 50 cm; elles peuvent être faites d'un métal quelconque. Le volume

d'échantillonnage correspond essentiellement à un cylindre de quelques centimètres de rayon autour des tiges parallèles (Knight, 1992). La longueur du câble coaxial qui relie la sonde au dispositif de traitement des signaux ne devrait pas dépasser les 30 m. On peut obtenir des profils de l'eau dans le sol à partir d'un ensemble de sondes enfouies horizontalement à différentes profondeurs et reliées à un enregistreur de données de terrain à travers un multiplexeur.

11.3.2.2 Mesures dans le domaine fréquentiel

Alors que la réflectométrie dans le domaine temporel a recours aux hyperfréquences dans la plage des gigahertz, les sondes dans le domaine fréquentiel mesurent la constante diélectrique à une seule fréquence située dans la plage des mégahertz. Celles-ci comportent un câble coaxial ouvert et un seul réflectomètre à l'extrémité pour mesurer l'amplitude et la phase sur une fréquence particulière. Les mesures dans le sol sont faites par référence à l'air et généralement étalonnées avec des blocs diélectriques ou des liquides de propriétés diélectriques connues ou les deux. L'avantage d'utiliser des liquides pour l'étalonnage est que l'on est assuré d'un contact diélectrique constant entre l'extrémité de la sonde et le matériau (Jackson, 1990).

Du fait qu'on emploie l'extrémité d'une seule petite sonde, on ne peut analyser qu'un volume réduit de sol et le contact avec le sol est primordial. Il en résulte que cette méthode est excellente pour les mesures en laboratoire ou les mesures ponctuelles, mais elle est vraisemblablement sujette à des problèmes de variabilité spatiale lorsqu'on l'utilise sur le terrain (Dirksen, 1999).

11.4 INSTRUMENTS DE MESURE DU POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL

Les instruments capables de mesurer le potentiel matriciel sont suffisamment fiables et peu coûteux pour être utilisés dans les programmes de surveillance sur le terrain. Dans chaque cas, cependant, l'instrument ne fonctionne correctement que sur une plage limitée de potentiels hydriques. Les tensiomètres ne sont efficaces que dans des sols humides, alors que les blocs à résistance électrique conviennent mieux aux sols modérément secs.

11.4.1 Tensiomètres

De tous les appareils de mesure du potentiel hydrique, le tensiomètre est le plus largement utilisé et le moins cher. C'est un dispositif simple, qui se compose généralement d'une capsule poreuse en cérami-

que et d'un tube en plastique scellé la reliant à un appareil d'enregistrement de la pression qui ferme le haut du tube. Il peut mesurer le potentiel matriciel du fait que les solutés peuvent circuler librement à travers la capsule poreuse.

Le tensiomètre établit une condition de quasi équilibre avec le système sol eau. La capsule poreuse en céramique agit comme une membrane laissant passer l'eau et, comme telle, doit rester saturée pour fonctionner correctement. En conséquence, on remplit initialement tous les pores de cette capsule et le tube avec de l'eau désaérée. Une fois en place, le tensiomètre est soumis à des potentiels sol eau négatifs, qui forcent l'eau à passer de l'appareil dans la matrice du sol environnant. En se déplaçant du tensiomètre vers le sol, l'eau crée dans le tube un potentiel négatif ou succion que l'appareil va enregistrer. Le dispositif d'enregistrement peut être un tube en U rempli d'eau ou de mercure ou les deux, un manomètre de Bourdon ou un transducteur de pression (Marthaler et al, 1983).

Si le potentiel hydrique du sol augmente, l'eau se déplace du sol vers le tensiomètre, ce qui se traduit par la lecture d'un potentiel en eau moins négatif. Cet échange d'eau entre le sol et le tensiomètre et l'exposition du tensiomètre à des potentiels négatifs vont forcer les gaz dissous à s'échapper de la solution sous forme de bulles. La formation de ces bulles dans le tube du tensiomètre entraîne des lectures de pression erronées. Il faut aussi noter comme restriction que, dans la pratique, $\psi \approx -85$ kPa est la limite inférieure de fonctionnement du tensiomètre. Au-delà de 100 kPa (≈ 1 atm), l'eau boue à la température ambiante et des bulles se forment qui vont détruire le vide à l'intérieur du tube du tensiomètre. En conséquence, il faut de temps en temps désaérer le tube avec une pompe à vide manuelle et le remplir à nouveau.

En cas de sécheresse, une quantité d'eau importante peut passer du tensiomètre dans le sol. Les tensiomètres risquent donc d'altérer la condition même qu'ils sont censés mesurer. Une autre preuve de ce processus est la forte densité racinaire souvent observée au voisinage immédiat des capsules en céramique après avoir retiré l'instrument enfoui dans le sol. Dans ces conditions où l'instrument « irrigue » le sol, une telle quantité d'eau est perdue par la capsule en céramique que le vide dans le cylindre ne peut pas être maintenu, ce qui cause l'arrêt des mesures.

Avant la mise en place, mais une fois seulement que le tensiomètre a été rempli d'eau et désaéré, la capsule de céramique doit rester humide. Pendant son transport du laboratoire à son emplacement sur le terrain, il faut la maintenir dans cet état en l'entou-

rant de chiffons mouillés ou en la plaçant dans un récipient d'eau. Sur le terrain, on prépare un trou du diamètre voulu pour bien épouser la forme du tube et d'une profondeur permettant au tensiomètre de dépasser suffisamment du sol pour pouvoir le désaérer et le remplir au besoin. Étant donné que la capsule de céramique doit rester en contact avec le sol, il convient, dans des sols pierreux, de préparer une boue liquide avec la terre du trou et de l'y verser avant d'y introduire le tensiomètre. Une fois le tensiomètre en place, il faut veiller aussi à ce que le trou soit rempli correctement, en éliminant toute poche qui pourrait entraîner l'accumulation d'eau autour de l'appareil. Cette dernière précaution permet de minimiser la descente de l'eau le long de la paroi du tube, déplacement qui pourrait provoquer des conditions sol eau non représentatives.

Bien qu'une faible portion de l'instrument soit soumise aux conditions ambiantes, l'interception des rayons solaires peut provoquer la dilatation thermique du tube dans sa partie supérieure. En outre, les gradients de température de la surface du sol à la capsule de céramique peuvent amener une dilatation ou un retrait thermique de sa partie inférieure qui fausse les lectures de potentiel hydrique. Pour minimiser ces effets, le tube devrait être mis à l'ombre et fabriqué en matériau non conducteur, et des lectures devraient être faites chaque jour à la même heure, de préférence tôt le matin.

Soulignons l'apparition du tensiomètre osmotique, dont le tube est rempli d'une solution de polymère afin de mieux fonctionner dans des sols secs. Pour de plus amples indications sur les tensiomètres, on se reportera à Dirksen (1999) et Mullins (2001).

11.4.2 **Blocs à résistance électrique**

Bien que les blocs à résistance électrique soient insensibles aux potentiels hydriques dans la partie humide de la plage de mesure, ce sont d'excellents compléments du tensiomètre. Ces blocs se composent d'électrodes placées dans un type quelconque de matériau poreux qui finit par atteindre un quasi équilibre hygrométrique avec le sol environnant après environ deux jours. Les matériaux les plus couramment utilisés sont l'étoffe de nylon, la fibre de verre et le gypse, avec une plage de fonctionnement allant d'environ -50 kPa (pour le nylon) ou -100 kPa (pour le gypse) jusqu'à -1 500 kPa. Généralement, la taille des blocs est de 4 cm x 4 cm x 1 cm. Les blocs en gypse durent quelques années, mais se détériorent plus rapidement dans des conditions de sol très humide ou salin (Perrier et Marsh, 1958).

Cette méthode permet de déterminer le potentiel hydrique en fonction de la résistance électrique, me-

surée à l'aide d'un pont de courant alternatif (généralement $\approx 1\ 000\ Hz$), car le courant continu produit des effets de polarisation. Cependant, la résistance est plus faible dans un sol salin, et on obtient une indication erronée de sol plus humide. Les blocs en gypse sont moins sensibles au sel parce que les électrodes sont constamment exposées à une solution saturée de sulfate de calcium. Les résultats obtenus avec ces blocs doivent être corrigés des effets de la température (Aggelides et Londra, 1998).

Comme les blocs à résistance électrique ne dépassent pas de la surface du sol, ils conviennent parfaitement aux réseaux agricoles semi permanents destinés à fournir des profils de potentiel hydrique, lorsque les installations sont réalisées avec soin et de manière systématique (OMM, 2001). Avant de faire le trou pour enfouir les blocs, il vaut mieux creuser une petite tranchée pour y placer les fils de connexion, afin de réduire au minimum l'écoulement de l'eau le long de ces fils vers le bloc. Un problème peut aussi se poser lorsque le sol se contracte ou se gonfle, car le contact avec le bloc risque d'être rompu. En revanche, ces dispositifs n'influent pas sur la distribution des racines de végétaux.

Les blocs à résistance électrique sont relativement peu coûteux, mais il convient de les étalonner individuellement. On le fait généralement en les saturant d'eau distillée et en les soumettant à une pression déterminée dans un appareil à plaque de pression (Wellings, Bell et Raynor, 1985). Cette procédure devrait être reprise à au moins cinq pressions différentes avant la mise en place. Malheureusement, la résistance est moindre sur une courbe de dessiccation que sur une courbe d'humidification, provoquant ainsi des erreurs d'hystéresis sur le terrain car les blocs sont longs à atteindre l'équilibre avec des sols d'humidité différente (Tanner et Hanks, 1952). Les courbes d'étalonnage ayant tendance à se modifier à l'usage, il faut reprendre l'étalonnage avant chaque installation et procéder à des vérifications régulières après coup, en laboratoire ou sur le terrain.

11.4.3 **Psychromètres**

Les psychromètres sont employés pour la recherche en laboratoire portant sur des échantillons de sol et servent de référence pour d'autres techniques (Mullins, 2001). Une version de terrain est également disponible, appelée psychromètre à thermocouple de Spanner (Rawlins et Campbell, 1986). Cet instrument se compose d'un thermocouple miniature, placé dans une petite chambre à paroi poreuse et refroidi par effet Peltier, qui condense l'eau à la jonction de deux fils. À mesure que l'eau s'évapore, la température de cette jonction décroît, ce qui produit un courant que l'on mesure. Ces appareils répondent

rapidement aux variations de potentiel hydrique du sol, mais sont très sensibles à la température et à la salinité (Merrill et Rawlins, 1972).

Le potentiel hydrique le plus bas généralement associé à l'absorption active d'eau par les plantes correspond à une humidité relative d'environ 98 à 100 pour cent. Cela signifie que si l'on veut mesurer le potentiel hydrique à 10 kPa près, il faut contrôler la température à au moins 0,001 K près. L'utilisation des psychromètres de terrain convient donc surtout aux potentiels matriciels bas, c'est-à-dire moins de -300 kPa. En outre, comme les composants de l'instrument ont une capacité thermique différente, les variations de la température diurne peuvent provoquer des gradients de température dans le psychromètre (Brunini et Thurtell, 1982). Il faudrait donc éviter de se servir de psychromètres à thermocouple de Spanner à des profondeurs inférieures à 0,3 m et il vaudrait mieux faire des lectures chaque jour à la même heure, de préférence tôt le matin. En conclusion, la psychrométrie du sol est une méthode difficile et exigeante, même pour les spécialistes.

11.5 TÉLÉDÉTECTION DE L'HUMIDITÉ DU SOL

Il a été souligné auparavant dans ce chapitre qu'un emplacement unique ne peut donner une connaissance absolue de l'humidité du sol à l'échelle régionale, mais uniquement une indication relative de sa variation, car les sols sont souvent très hétérogènes. Mais il est toutefois possible de nos jours de faire appel à des techniques de télédétection à l'aide d'instruments montés à bord de satellites, afin de déterminer l'humidité du sol dans sa couche superficielle. Cela permet de procéder à des interpolations à l'échelle moyenne pour estimer les taux d'évapotranspiration, évaluer le stress chez les végétaux, etc., et de faciliter l'intégration des données de bilan hydrique dans les modèles du temps (Jackson et Schmugge, 1989; Saha, 1995). L'utilité de la détermination de l'humidité du sol aux stations météorologiques s'est accrue considérablement, car les mesures satellite ont besoin de «données de vérification au sol» afin d'assurer une exactitude satisfaisante. En outre, il est nécessaire de procéder à des mesures de station afin d'obtenir de l'information sur l'humidité dans des couches plus profondes, ce qui est impossible avec les technologies satellitaires et aéroportées. Certains principes concernant la mesure aéroportée de l'humidité du sol sont exposés ici; pour plus de détails, on se reportera au chapitre 8 de la Partie II.

Deux propriétés particulières de l'eau dans le sol la rendent accessible à la télédétection. D'abord,

comme cela a déjà été mentionné plus haut dans le contexte de la réflectométrie dans le domaine temporel, la constante diélectrique de l'eau est une dizaine de fois plus importante que celle des sols secs aux hyperfréquences. En télédétection, cette propriété peut être utilisée de manière passive ou active (Schmugge, Jackson et McKim, 1980). Les mesures passives analysent les émissions naturelles d'hyperfréquences de la surface terrestre, alors que les mesures actives évaluent la partie rétrodiffusée d'un signal envoyé par le satellite.

Un radiomètre à hyperfréquences enregistre une émissivité allant de 0,95 à 0,6 ou moins pour les mesures passives. Dans le cas des mesures radar actives par satellite, on observe une augmentation de 10 db en retour quand le sol passe de sec à humide. L'émission d'hyperfréquences est dénommée température de brillance, T_b , et elle est proportionnelle à l'émissivité, β , et à la température du sol à la surface, T_{soil} soit :

$$T_b = \beta T_{soil} \quad (11.9)$$

dans laquelle T_{soil} est exprimée en degrés Kelvin et β dépend de la texture du sol, de sa rugosité, et de la végétation. Tout couvert végétal agira sur la composante sol. La relation entre la teneur en eau volumique et la rétrodiffusion active totale, S_v , s'écrit :

$$\theta_v = L (S_t - S_v) (RA)^{-1} \quad (11.10)$$

où L est le coefficient d'atténuation de la végétation, S_v la rétrodiffusion due à la végétation, R le terme de rugosité du sol en surface et A un terme de sensibilité à l'humidité du sol.

Il en résulte que la réponse par hyperfréquences à la teneur en eau du sol peut être exprimée sous forme d'une relation empirique. La profondeur d'échantillonnage du sol est de l'ordre de 5 à 10 cm. La technique passive est fiable, mais sa résolution en pixels est limitée à 10 km en raison de la taille restreinte des antennes satellites. La résolution des radars satellite actifs est plus de 100 fois supérieure, mais le signal rétrodiffusé est très sensible à la rugosité de la surface, et il est nécessaire d'effectuer un étalonnage à partir de données de surface.

Dans le domaine de la télédétection, la deuxième propriété de l'eau dans le sol dont il faut tenir compte est sa capacité ou conductivité thermique importante. La plupart des sols présentent, par conséquent, une forte inertie thermique. Par temps clair, on peut avoir recours aux données de télédétection sur les variations diurnes de la température de surface pour estimer l'humidité du sol (Idso et al., 1975; Van de Griek, Camillo et Gurney, 1985).

11.6

**CHOIX DE L'EMPLACEMENT
ET DE LA TAILLE DE L'ÉCHANTILLON**

Les observations courantes de l'humidité du sol aux principales stations devraient être effectuées à plusieurs profondeurs, entre 10 cm et 1 m, et plus bas également, si l'infiltration est très profonde. Il faut procéder aux observations à peu près toutes les semaines. Les mesures indirectes ne doivent pas être nécessairement faites à l'intérieur de l'enclos des instruments météorologiques, mais plutôt au voisinage de celui-ci, sous une surface naturelle suffisamment horizontale et représentative du milieu non cultivé.

La représentativité de tout point d'observation de l'humidité du sol est restreinte en raison de la forte probabilité de variations importantes, à la fois sur le plan horizontal et vertical, de la structure du sol (porosité, masse volumique, composition chimique). La détermination de la teneur en eau gravimétrique n'étant fiable qu'au point de mesure, on a donc besoin d'un grand nombre d'échantillons pour décrire adéquatement les conditions d'humidité du sol sur le site. Pour calculer le nombre d'échantillons nécessaires pour atteindre l'exactitude voulue, on peut se servir de la formule suivante :

$$n = 4 (\sigma^2/L^2) \quad (11.11)$$

où σ^2 est la variance de l'échantillon déduite d'un échantillonnage préliminaire. En supposant que l'échantillonnage préliminaire a donné une σ^2 (type) de 25 pour cent et que nous recherchons une exactitude de l'ordre de 3 pour cent, il faudrait 12 échantillons pour notre site (en se fondant sur l'hypothèse que la teneur en eau est distribuée de manière gaussienne sur le site).

La méthode régionale consiste à diviser l'endroit en strates selon l'uniformité des paramètres visés (par exemple réponse hydrologique, texture et type de sol, couverture végétale, pente, etc.). Il faut ensuite échantillonner chaque strate indépendamment et recombiner les données ainsi obtenues en les pondérant en fonction de la superficie relative de chaque strate. Le facteur le plus déterminant qui influe sur la répartition de l'eau du sol dans un bassin versant à faible pente est la topographie, critère qui suffit souvent pour subdiviser le bassin en unités spatiales de réponse homogène. De la même manière, une terre à pâturages en pente devra être beaucoup plus échantillonnée qu'une terre cultivable plate. La présence de végétation tend toutefois à diminuer les variations de l'humidité du sol dues à la topographie.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Aggelides, S.M. et Londra, P.A., 1998 : Comparison of empirical equations for temperature correction of gypsum sensors. *Agronomy Journal*, 90, pp. 441–443.
- Brunini, O. et Thurtell, G.W., 1982 : An improved thermocouple hygrometer for in situ measurements of soil water potential. *Soil Science Society of America Journal*, 46, pp. 900–904.
- Campbell, D.J. et Henshall, J.K., 2001 : Bulk density. In: K.A. Smith and C.E. Mullins, *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*, Marcel Dekker, New York, pp. 315–348.
- Deardorff, J.W., 1978 : Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83, pp. 1889–1904.
- Dirksen, C., 1999 : *Soil Physics Measurements*. Catena Verlag, Reiskirchen, Allemagne, 154 pp.
- Dirksen, C. et Dasberg, S., 1993 : Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 57, pp. 660–667.
- Drungil, C.E.C., Abt, K. et Gish, T.J., 1989 : Soil moisture determination in gravelly soils with time domain reflectometry. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 32, pp. 177–180.
- Gardner, W.H. et Calissendorff, C., 1967 : Gamma-ray and neutron attenuation measurement of soil bulk density and water content. *Proceedings of the Symposium on the Use of Isotope and Radiation Techniques dans Soil Physics and Irrigation Studies* (Istanbul, 12-16 juin 1967). Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, pp. 101–112.
- Gardner, C.M.K., Robinson, D.A., Blyth, K. et Cooper, J.D., 2001 : Soil water content. Dans : Smith, K.A. et Mullins, C.E., *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*, Marcel Dekker, New York, pp. 1–64.
- Gee, G.W. et Dodson, M.E., 1981 : Soil water content by microwave drying: A routine procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 45, pp. 1234–1237.
- Greacen, E.L., 1981 : *Soil Water Assessment by the Neutron Method*. CSIRO, Australie, 140 pp.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J. et Schmugge, T.J., 1975 : The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of sun for soil water status. *Journal of Geophysical Research*, 80, pp. 3044–3049.
- Jackson, T.J., 1990 : Laboratory evaluation of a field-portable dielectric/soil moisture probe. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, pp. 241–245.
- Jackson, T.J. et Schmugge, T.J., 1989 : Passive microwave remote sensing system for soil moisture: Some supporting research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27, pp. 225–235.
- Klute, A. (ed.), 1986: *Methods of Soil Analysis, Part 1 : Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, États Unis d'Amérique, 1188 pp.
- Knight, J.H., 1992 : Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resources Research*, 28, pp. 2345–2352.
- Marthaler, H.P., Vogelsanger, W., Richard, F. et Wierenga, J.P., 1983 : A pressure transducer for field tensiometers. *Soil Science Society of America Journal*, 47, pp. 624–627.
- Merrill, S.D. et Rawlins, S.L., 1972 : Field measurement of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Science*, 113, pp. 102–109.
- Mullins, C.E., 2001 : Matric potential. Dans : Smith, K.A. et Mullins, C.E., *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Marcel Dekker, New York, pp. 65–93.
- Organisation météorologique mondiale, 1968 : *Practical Soil Moisture Problems in Agriculture*. Note technique n° 97, OMM-N° 235.TP.128, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989 : *Land Management in Arid and Semi-arid Areas*. Note technique n° 186, OMM-N° 662, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2001 : *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel* (J. Wieringa et J. Lomas). Deuxième édition, OMM-N° 551, Genève.
- Perrier, E.R. et Marsh, A.W., 1958 : Performance characteristics of various electrical resistance units and gypsum materials. *Soil Science*, 86, pp. 140–147.
- Rawlins, S.L. et Campbell, G.S., 1986 : Water potential: Thermocouple psychrometry. Dans: A. Klute, (ed.), *Methods of Soil Analysis – Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, États Unis d'Amérique, pp. 597–618.
- Saha, S.K., 1995 : Assessment of regional soil moisture conditions by coupling satellite sensor data with a soil-plant system heat and moisture balance model. *International Journal of Remote Sensing*, 16, pp. 973–980.
- Schmugge, T.J., Jackson, T.J. et McKim, H.L., 1980 : Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16, pp. 961–979.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Tanner, C.B. et Hanks, R.J., 1952 : Moisture hysteresis in gypsum moisture blocks. *Soil Science Society of America Proceedings*, 16, pp. 48–51.
- Topp, G.C., Davis, J.L. et Annan, A.P. 1980 : Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, pp. 574-582.
- Van de Griend, A.A., Camillo, P.J. et R.J. Gurney, 1985 : Discrimination of soil physical parameters, thermal inertia and soil moisture from diurnal surface temperature fluctuations. *Water Resources Research*, 21, pp. 997–1009.
- Visvalingam, M. et Tandy, J.D., 1972 : The neutron method for measuring soil moisture content : A review. *European Journal of Soil Science*, 23, pp. 499–511.
- Wellings, S.R., Bell, J.P. et Raynor, R.J., 1985 : *The Use of Gypsum Resistance Blocks for Measuring Soil Water Potential in the Field*. Report No. 92, Institute of Hydrology, Wallingford, Royaume-Uni.

CHAPITRE 12

MESURE DE LA PRESSION, DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'HUMIDITÉ EN ALTITUDE

12.1 GÉNÉRALITÉS

12.1.1 Définitions

Les définitions suivantes tirées des publications OMM-N° 182 et OMM-N° 544 se rapportent aux mesures en altitude effectuées à l'aide d'une radiosonde :

Observation de radiosondage (radiosondage): Observation d'éléments météorologiques en altitude (il s'agit généralement de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité) au moyen d'une radiosonde. Note : La radiosonde peut être fixée sous un ballon ou bien lâchée depuis un aéronef ou une fusée (catasonde).

Observation en altitude : Observation effectuée dans l'atmosphère libre, directement ou indirectement.

Radiosonde : Instrument destiné à être emporté par ballon dans l'atmosphère, muni de dispositifs pour mesurer une ou plusieurs variables météorologiques (pression, température, humidité, etc.) et pourvu d'un émetteur radioélectrique qui transmet ces renseignements à la station d'observation.

Sondage : Détermination d'un ou de plusieurs éléments météorologiques en altitude au moyen d'instruments emportés par ballon, aéronef, cerf-volant, planeur, fusée, etc.

Station de radiosondage : Station où l'on procède, par des moyens électroniques, à des observations en altitude de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité.

Station d'observation en altitude, station synoptique d'observation en altitude, station aérologique : Site en surface à partir duquel sont effectuées des observations en altitude.

Ce chapitre traite surtout des systèmes de radiosondage. Les observations effectuées à l'aide de plates-formes spéciales ou d'équipement spécialisé ou réalisées indirectement au moyen de méthodes de télédétection sont examinées dans différents chapitres de la Partie II du présent Guide. Les systèmes de radiosondage servent généralement à mesurer la pression, la température et l'humidité relative. On les emploie aussi, dans la plupart des stations d'observation, pour déterminer les vents en altitude (voir chapitre 13, Partie I). Certaines radiosondes comportent des systèmes de détection de

paramètres atmosphériques, comme la concentration de l'ozone et la radioactivité. Ces types de mesures ne seront pas décrits en détail dans ce chapitre.

12.1.2 Unités employées pour les observations en altitude

Les unités de mesure des éléments météorologiques observés par radiosondage sont l'hectopascal pour la pression, le degré Celsius pour la température et le pourcentage pour l'humidité relative. Cette dernière est exprimée par rapport à la tension de vapeur saturante au-dessus d'une surface d'eau, même à des températures inférieures à 0 °C.

L'unité d'altitude géopotentielle employée dans les observations aérologiques est le mètre géopotentiel standard, qui correspond à 0,980 665 mètre. Dans la troposphère, la valeur de l'altitude géopotentielle est à peu près égale à celle de l'altitude réelle.

Il est recommandé d'utiliser les valeurs des constantes et fonctions physiques adoptées par l'OMM dans le Règlement technique (OMM-N° 49) quand on effectue des calculs de radiosondage.

12.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

12.1.3.1 Données de radiosondage pour les activités météorologiques

La température et l'humidité relative en altitude sont deux mesures de base qui servent à initialiser les analyses exécutées par les modèles de prévision numérique du temps, pour les besoins de la prévision météorologique opérationnelle. Les radiosondes fournissent la plupart des mesures in situ de la température et de l'humidité relative au-dessus des terres, mais uniquement une couverture limitée en la matière au-dessus des océans, puisqu'elles sont alors lancées à partir d'îles ou de navires relativement isolés. Il est possible d'observer les températures à partir d'un aéronef, avec une résolution verticale identique à celle des radiosondes, pendant la montée et la descente ainsi qu'aux niveaux de croisière. Les observations d'aéronefs complètent les observations de radiosondage, en particulier au-dessus des mers. Les observations satellitaires de la distribution de la vapeur d'eau et de la température ont une résolution verticale plus faible que les mesures effectuées à l'aide de radiosondes ou depuis un aéronef, mais ce

sont elles principalement qui servent aux analyses de la prévision numérique du temps dans les zones océaniques et dans d'autres régions du globe, où les données fournies par les radiosondes et les aéronefs sont insuffisantes ou absentes.

Pour établir une prévision, quel qu'en soit le type, mais en particulier à l'échelle régionale et locale, il est indispensable de disposer de mesures exactes de la structure verticale des champs de température et de vapeur d'eau dans la troposphère. Ces mesures indiquent la constitution des couches de nuages ou de brouillard en épaisseur. Par ailleurs, la structure verticale des champs de température et de vapeur d'eau détermine la stabilité de l'atmosphère et, par conséquent, la nébulosité et le type de nuage qui seront prévus. Les mesures de la structure verticale obtenues par radiosondage présentent généralement un degré d'exactitude qui suffit à la plupart des utilisations. Toutefois, les erreurs négatives systématiques qui entachent les relevés par radiosondage de valeurs élevées d'humidité dans les nuages sont problématiques pour les analyses de prévisions numériques du temps lorsqu'elles ne sont pas compensées.

Les études de pollution exigent des mesures à haute résolution du profil vertical de la température et de l'humidité relative (pour déterminer par exemple l'épaisseur de la couche limite atmosphérique). Il est également nécessaire d'obtenir des données à haute résolution pour prévoir les effets de la réfraction atmosphérique sur la propagation du rayonnement électromagnétique ou des ondes sonores.

On a besoin, pour l'aviation civile, l'artillerie et d'autres applications de la balistique (comme le lancement de véhicules spatiaux), d'observations de la masse volumique de l'air à certaines pressions (dérivées de données sur la température et l'humidité relative fournies par des radiosondes).

Les observations de radiosondage sont primordiales pour les études de l'évolution du climat en altitude. Il importe donc d'indiquer adéquatement les systèmes employés pour obtenir les mesures, de même que les modifications apportées aux procédures d'exploitation ou de correction associées à l'équipement en question. Ainsi s'est-il révélé nécessaire de déterminer les changements survenus dans les instruments et les méthodes de radiosondage depuis que l'on recourt régulièrement aux radiosondes (voir par exemple OMM/TD-N° 541). Pour les besoins des études sur l'évolution du climat reposant sur des mesures effectuées à l'aide de radiosondes, il faut que les erreurs systématiques soient très stables. À l'époque où l'on a commencé à se servir de radiosondes pour observer des éléments météorologiques telles l'humidité relative et la pression, les erreurs étaient trop

grandes pour que les données soient valables à long terme à toutes les altitudes. Il a donc fallu modifier la conception des radiosondes pour les améliorer. En raison des réductions budgétaires qui frappent les activités météorologiques, les produits consommables doivent par ailleurs demeurer peu coûteux si on ne veut pas restreindre l'utilisation des radiosondes. Les utilisateurs doivent, par conséquent, accepter certains compromis sur le plan de l'exactitude des mesures, en tenant compte que les fabricants produisent des systèmes capables de fonctionner dans un très large éventail de conditions atmosphériques :

- Pression de 5 à 1 050 hPa ;
- Température de -90 à 50 °C ;
- Humidité relative de 1 à 100 % ;

en offrant un rendement fiable et constant notamment sous de fortes pluies, sous l'effet d'orages et dans des conditions extrêmes de givrage.

12.1.3.2 Relations entre les mesures en altitude par satellite et par radiosonde

Les systèmes d'observation satellitaire à visée verticale n'offrent pas la même exactitude ni le même niveau de confiance que les radiosondes ou les systèmes d'aéronefs dans les mesures de la structure verticale. Les systèmes actuels de sondage par satellite de la température et de la vapeur d'eau détectent la luminance spectrale réfléchie par le dioxyde de carbone ou la vapeur d'eau dans l'infrarouge, ou encore celle réfléchie par l'oxygène ou la vapeur d'eau dans les hyperfréquences (voir chapitre 8, Partie II). La luminance énergétique observée dans une bande spectrale par les capteurs d'un satellite est constituée d'émissions atmosphériques mesurées à plusieurs altitudes. Cet éventail d'altitudes est déterminé par la distribution des gaz émetteurs dans le plan vertical et par l'absorption atmosphérique dans le domaine de longueurs d'onde du canal de mesure. La plupart des valeurs de luminance obtenues dans des canaux de température fournissent une approximation de la température moyenne dans une couche d'au moins 10 kilomètres d'épaisseur. La distribution verticale (fonction de pondération) de la luminance mesurée par le canal de température varie dans une certaine mesure en fonction de l'emplacement géographique. Cela tient au fait que les propriétés de transfert radiatif de l'atmosphère dépendent légèrement de la température. Les concentrations des gaz émetteurs peuvent varier faiblement selon l'emplacement et les nuages; les aérosols et les poussières volcaniques peuvent également modifier l'échange de chaleur radiative. Ainsi, les observations de la température par satellite offrent une bonne résolution horizontale et une couverture spatiale satisfaisante à l'échelle du globe, pour des couches relativement épaisses dans le plan vertical. Il peut être toutefois difficile de spécifier, à un emplacement donné, la distribution verticale précise des émissions atmosphériques observées.

La plupart des luminances énergétiques enregistrées au moyen de canaux de vapeur d'eau d'instruments à visée verticale dans la troposphère proviennent de couches atmosphériques ayant une épaisseur de 4 à 5 kilomètres. Les pressions de ces couches sont davantage fonction de l'emplacement que celles mesurées par les canaux de température. Cela est dû au fait que l'épaisseur et la pression centrale de la couche dépendent fortement de la distribution de la vapeur d'eau dans le plan vertical. Par exemple, les couches observées à l'aide d'un canal de vapeur d'eau donné sont plus basses lorsque la haute troposphère est très sèche. Étant donné que les luminances énergétiques décelées par un canal de vapeur d'eau varient en fonction de la température de la vapeur d'eau, on ne peut déduire la distribution verticale de cette dernière qu'après avoir mesuré la structure verticale de la température.

Les systèmes d'observation satellitaire à visée latérale permettent de mesurer la structure de l'atmosphère suivant une meilleure résolution verticale qu'avec les systèmes à visée verticale; ainsi est-il possible par exemple d'obtenir une estimation de la répartition spatiale de la température et de la vapeur d'eau par la technique de radio-occultation s'appuyant sur les récepteurs GPS (système de positionnement global) embarqués. Selon cette technique, la structure verticale est mesurée le long de trajectoires d'au moins 200 km dans le plan horizontal (Kursinski et al., 1997).

Les techniques mises au point pour intégrer les données de sondage satellite dans les modèles de prévision numérique du temps incorporent des informations fournies par d'autres systèmes d'observation, principalement les radiosondes et les systèmes d'aéronefs. Ces informations peuvent provenir d'une évaluation initiale de la structure verticale à un emplacement donné, évaluation déduite de champs de modèles de prévision ou tirée de catalogues de structures verticales possibles reposant sur les mesures par radiosonde propres à l'emplacement géographique ou au type de masse d'air. On se sert aussi des mesures de radiosondage pour vérifier les observations effectuées par différents satellites ou par un canal donné à des angles divers. Les comparaisons peuvent se faire directement avec les observations de radiosondage, ou indirectement par l'effet de ces observations sur le profil vertical des champs de prévision numérique.

En résumé, les systèmes de radiosondage et d'observation par satellite se complètent pour fournir des mesures d'une fiabilité accrue à l'échelle du globe.

12.1.3.3 Altitude maximale de radiosondage

On a recours régulièrement au radiosondage pour obtenir des mesures jusqu'à des altitudes d'environ 35 km. Toutefois, beaucoup de radiosondages dans le

monde n'atteignent pas plus de 25 km d'altitude environ, en raison du coût élevé des ballons et des gaz utilisés pour faire monter l'équipement au niveau des pressions les plus basses. Comme on observe une augmentation rapide des erreurs de température dans les basses pressions avec de nombreux systèmes de radiosondage, il est impossible d'employer certains d'entre eux pour ce type d'observation.

La contamination des capteurs en cours de vol et les constantes de temps très longues de ceux-ci dans les conditions de basses températures et pressions limitent à la troposphère l'utilité de l'observation de l'humidité relative au moyen de radiosondes.

12.1.3.4 Exigences en matière d'exactitude

Les deux sections qui suivent récapitulent les exigences en matière d'exactitude et les comparent aux performances opérationnelles des radiosondes. On examinera ensuite en détail les performances et les sources d'erreurs.

Les données sur l'exactitude que doivent présenter les observations de radiosondage figurent dans l'annexe 12.A. La note technique N° 112 de l'OMM décrit une méthode très utile pour évaluer les performances des systèmes d'observation, laquelle a des implications au niveau de la conception. Le rendement est établi en fonction de la variabilité atmosphérique observée. On définit deux seuils :

- a) Le seuil de performance au-dessus duquel il n'est pas nécessaire d'apporter des améliorations pour diverses applications;
- b) Le seuil de performance au-dessous duquel les données obtenues sont peu utiles pour diverses applications.

Les seuils de performance déterminés dans la note technique N° 112 de l'OMM pour les mesures du vent en altitude et pour les observations de la température, de l'humidité relative et de la hauteur géopotentielle par radiosonde sont présentés dans les tableaux 1 à 4 de l'annexe 12.B.

12.1.3.5 Température: exigences et performances

La plupart des systèmes modernes de radiosondage mesurent la température dans la troposphère avec une erreur type se situant entre 0,2 et 0,5 K. Leurs performances sont généralement inférieures, d'un facteur de 3, au rendement optimal proposé dans le tableau 2 de l'annexe 12.B. Toutefois, on constate encore des erreurs types supérieures à 1 K dans certains réseaux des régions tropicales. Les mesures effectuées à ces stations se situent en deçà du seuil inférieur de performance du tableau 2 (annexe 12.B) et les données ainsi obtenues ont peu d'utilité pour l'objectif à atteindre.

Aux pressions supérieures à environ 30 hPa dans la stratosphère, l'exactitude de la plupart des radiosondes modernes est semblable à celle atteinte dans la troposphère. Ainsi, dans cette partie de la stratosphère, les erreurs de mesure correspondent à environ deux fois le seuil de rendement optimal établi. Aux pressions inférieures à 30 hPa, les erreurs produites par d'anciens types de radiosondes augmentent rapidement avec la baisse de la pression et, dans certains cas, approchent de la limite où les données cessent d'être utiles pour l'objectif à atteindre. La hausse rapide des erreurs dans les mesures de la température à très basse pression provient de l'accroissement des erreurs de température associées au rayonnement infrarouge et solaire, allié à une augmentation importante des erreurs dans les altitudes attribuées aux températures. Lorsque les pressions sont très basses, même les erreurs de pression relativement minimales produisent de grandes erreurs d'altitude et, donc, de température (voir section 12.1.3.7).

12.1.3.6 Humidité relative

Les mesures de l'humidité relative effectuées à l'aide de radiosondes modernes comportent des erreurs deux ou trois fois supérieures au seuil de performance optimale (proposé dans le tableau 3 de l'annexe 12.B) pour des valeurs élevées d'humidité relative troposphérique, au-dessus de la couche limite de convection. Par ailleurs, ces erreurs augmentent quand la température baisse. Avec certains types de

détecteurs, les erreurs à des températures inférieures à -40 °C sont telles que les mesures n'ont plus aucune valeur pour l'application.

12.1.3.7 Altitude géopotentielle

Les erreurs relevées lorsque les altitudes géopotentielles sont déterminées à partir d'observations de radiosondage diffèrent selon qu'il s'agit de l'altitude d'un niveau de pression spécifié ou de l'altitude correspondant à un point d'inflexion dans la structure de la température ou de l'humidité relative, comme la tropopause. L'erreur $\varepsilon_z(t_1)$ de mesure de l'altitude géopotentielle à un moment donné du vol est fournie par la formule suivante :

$$\varepsilon_z(t_1) = \frac{R}{g} \int_{p_0}^{p_1} [\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p)] \frac{dp}{p} + \frac{R}{g} \int_{p_1}^{p_1 + \varepsilon_p(p_1)} [T_v(p) + \varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p)] \frac{dp}{p} \quad (12.1)$$

où p_0 est la pression en surface, p_1 la pression vraie au temps t_1 , $p_1 + \varepsilon_p(p_1)$ la pression réelle indiquée par la radiosonde au temps t_1 , $\varepsilon_T(p)$ et $\varepsilon_p(p)$ les erreurs de mesure de la température et de la pression, en fonction de la pression, $T_v(p)$ la température virtuelle à la pression p , et R et g les constantes des gaz parfaits et de la gravitation précisées dans le *Règlement technique* de l'OMM (appendice A, OMM-N° 49).

Tableau 12.1. Erreurs d'altitude géopotentielle (m)

(Erreurs types aux niveaux standard $\varepsilon_z(p_s)$ et aux niveaux significatifs $\varepsilon_z(t_1)$ pour des erreurs de température ε_T et de pression ε_p données, aux ou près des niveaux spécifiés.
Les erreurs sont identiques dans les hémisphères Nord et Sud)

	300 hPa	100 hPa	30 hPa	10 hPa
<i>Erreur de température $\varepsilon_T = 0,25$ K ; erreur de pression $\varepsilon_p = 0$ hPa</i>				
Niveaux standards et significatifs	9	17	26	34
<i>Erreur de température $\varepsilon_T = 0$ K ; erreur de pression $\varepsilon_p = 1$ hPa</i>				
25° N				
Niveau standard	3	12	- 2	- 24
Niveau significatif	27	72	211	650
50° N l'été				
Niveau standard	3	5	1	- 20
Niveau significatif	26	72	223	680
50° N l'hiver				
Niveau standard	3	5	6	- 4
Niveau significatif	26	70	213	625

Pour un niveau de pression standard établi, p_s , la pression de la limite d'intégration supérieure dans le calcul des altitudes est spécifiée et non sujette à des erreurs de mesure. On peut donc formuler ainsi les erreurs d'altitude géopotentielle des niveaux de pression standard :

$$\varepsilon_z(p_s) = \frac{R}{g} \frac{p_s}{p_0} \equiv [\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p)] \frac{dp}{p} \quad (12.2)$$

Le tableau 12.1 montre, pour des atmosphères typiques, les erreurs d'altitude géopotentielle causées directement par les capteurs de radiosonde. On voit qu'il est possible de bien mesurer les géopotentiels de niveaux de pression donnés, ce qui est pratique pour l'analyse synoptique et numérique des surfaces à pression constante. Il peut toutefois survenir des erreurs importantes dans les altitudes de niveaux significatifs, comme la tropopause et d'autres points d'inflexion, mais on peut calculer divers niveaux entre les niveaux standard.

De grandes erreurs d'altitude dans la stratosphère associées à des erreurs de 2 ou 3 hPa au niveau des capteurs de pression sont susceptibles d'influer sensiblement sur les mesures régulières effectuées dans les régions tropicales, toujours marquées par de forts gradients thermiques verticaux dans toute la stratosphère. Les concentrations d'ozone stratosphérique ayant également des gradients verticaux prononcés, les erreurs d'attribution d'altitudes conduiront à des erreurs significatives dans les messages d'observation des sondes d'ozone à toutes les latitudes.

Le besoin de performance optimale concernant la mesure de l'altitude des surfaces isobares dans un réseau synoptique, ce dont il est question au tableau 4 de l'annexe 12.B, impose des exigences rigoureuses quant à l'exactitude des mesures par radiosonde. Ainsi, le rendement des meilleures radiosondes modernes serait considéré comme bon si les erreurs de hauteur étaient cinq fois supérieures à la performance optimale dans la troposphère et dix fois supérieures dans la stratosphère.

12.1.4 Méthodes de mesure

Cette section traite de manière générale des méthodes de radiosondage. Des renseignements plus précis sur les instruments et les procédures employés sont donnés dans d'autres parties.

12.1.4.1 Contraintes relatives à la conception des radiosondes

Certains compromis sont inévitables lorsque l'on conçoit une radiosonde. On obtient une fiabilité maximale dans les mesures de la température quand

on place les capteurs sans protection au-dessus de la radiosonde, mais ceux-ci sont alors directement exposés au rayonnement solaire. Dans la plupart des modèles récents, les capteurs de température sont revêtus d'une couche spéciale, afin de réduire au minimum le réchauffement solaire. On corrige ensuite les mesures, pour tenir compte du réchauffement solaire résiduel, pendant le traitement informatique des données. Presque tous les capteurs d'humidité relative doivent être protégés contre la pluie. Le recours à une plaque ou à un tube de protection réduit la ventilation du capteur et, par conséquent, la vitesse de réponse de l'ensemble du système de détection. Ces dispositifs de protection constituent par ailleurs une source de contamination après la traversée de nuages. Toutefois, il demeure généralement plus intéressant de protéger les capteurs d'humidité relative contre la pluie ou la glace que de les exposer directement à l'air ambiant. Ces capteurs sont donc habituellement munis de plaques ou de tubes de protection. Les capteurs de pression sont généralement montés à l'intérieur, afin de réduire au minimum les variations de température pendant le vol et de ne pas gêner l'exposition des capteurs de température et d'humidité relative.

Les autres qualités recherchées sont la fiabilité, la robustesse, la légèreté et la compacité. Avec les possibilités du multiplexage électronique moderne, il est également important d'obtenir une fréquence élevée d'échantillonnage, si possible égale à environ une mesure par seconde, ce qui correspond à 5 mètres au moins dans le plan vertical. Étant donné que les radiosondes ne sont utilisées qu'une ou quelques fois, il doit être possible de les produire en série à faible coût. Un étalonnage facile et stable est essentiel, car les appareils sont souvent entreposés pendant de longues périodes (plus d'une année) avant l'emploi. (La plupart des stations qui revêtent une grande importance pour le Système mondial d'observation du climat se situent en des lieux (en Antarctique par exemple) où il est impossible de livrer des radiosondes plus d'une fois par an.)

Une radiosonde doit être en mesure de transmettre un signal intelligible à un récepteur terrestre sur une distance oblique d'au moins 200 kilomètres. La tension de la batterie de la radiosonde varie en fonction du temps et de la température. Ces variations ne doivent toutefois pas perturber l'exactitude des mesures ni provoquer de dérive excessive dans les fréquences radioélectriques de transmission.

12.1.4.2 Fréquences radioélectriques utilisées par les radiosondes

Les bandes du spectre de fréquences radioélectriques actuellement employées pour la plupart des transmissions de radiosondes sont présentées dans le ta-

bleau 12.2. Elles correspondent aux attributions spécifiées pour les auxiliaires de la météorologie dans les règlements du secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT).

Tableau 12.2.
Fréquences primaires utilisées par les radiosondes dans les bandes des auxiliaires de la météorologie

<i>Bandes de fréquences radioélectriques (MHz)</i>	<i>Statut</i>	<i>Régions UIT</i>
400,15 - 406	Primaire	Toutes
1 668,4 - 1 700	Primaire	Toutes

Note : La plupart des systèmes radars secondaires fabriqués et déployés en Russie fonctionnent sur une bande de fréquences radioélectriques centrée sur 1 780 MHz.

Le choix des radiofréquences pour les transmissions de radiosondes dans un lieu donné repose sur de nombreux facteurs. Dans les régions où les vents en altitude sont forts, la distance oblique des radiosondes est généralement importante et l'altitude des ballons souvent très basse. Il est alors recommandé d'opter pour la bande de 400 MHz, qui assure une meilleure liaison radiosonde-système terrestre que la bande de 1 680 MHz. Quand les vents en altitude sont plus faibles, les fréquences sont généralement choisies selon la méthode de mesure des vents en altitude utilisée (voir chapitre 13, Partie I), soit 400 MHz quand la mesure du vent repose sur un système d'aide à la navigation et 1 680 MHz quand la poursuite de la radiosonde est assurée par un radiotéodolite ou un radar.

Les fréquences radioélectriques du tableau 12.2 sont partagées avec d'autres services. Dans certains cas, l'organisme national chargé des radiocommunications a attribué une partie des bandes disponibles à d'autres utilisateurs et les bandes des radiosondes ne sont pas entièrement réservées à cet usage. Dans les pays dotés d'un réseau de radiosondage dense, il existe des spécifications rigoureuses concernant la dérive des radiofréquences et la largeur de bande occupée par un vol.

Une organisation qui a l'intention de lancer des radiosondes doit vérifier si les fréquences voulues sont disponibles et s'il n'y a pas de risque d'interférence avec les activités de radiosondage du Service météorologique national.

On observe actuellement un fort mouvement, appuyé par les organismes gouvernementaux de radiocommunication, pour rationaliser l'emploi des fréquences radioélectriques. Celles-ci devront donc être partagées entre un plus large éventail d'utilisa-

teurs. Les systèmes de radiosondage à large bande qui occupent la plus grande partie du spectre réservé aux bandes des auxiliaires de la météorologie disparaîtront dans de nombreux pays. La plupart des pays doivent donc se préparer à ces changements en considérant que les émetteurs et les récepteurs de radiosonde exploiteront à l'avenir des largeurs de bande inférieures à 1 MHz afin d'éviter les interférences. La stabilité de la transmission devrait être inférieure à ± 5 kHz dans les pays dotés de réseaux de radiosondage denses et ne pas dépasser ± 200 kHz dans la majorité des autres pays.

Les Services météorologiques nationaux doivent demeurer en contact avec les autorités nationales chargées des radiocommunications dans le but de conserver les attributions de fréquences radioélectriques nécessaires et de veiller à protéger leurs activités d'éventuelles interférences. Il faut en outre éviter les interférences avec les plates-formes de collecte de données transmettant des informations vers les satellites météorologiques à des fréquences situées entre 401 et 403 MHz, avec les liaisons descendantes de satellites météorologiques entre 1 690 et 1 700 MHz et avec les opérations de télécommande et d'acquisition de données associées à des satellites météorologiques à un nombre limité de sites entre 1 670 et 1 690 MHz.

12.2 ÉLECTRONIQUE EMBARQUÉE

12.2.1 Caractéristiques générales

Une radiosonde est essentiellement constituée de trois parties :

- a) Des capteurs et dispositifs de référence ;
- b) Un transducteur électronique, qui convertit l'énergie à la sortie des capteurs et des dispositifs de référence en signaux électriques ;
- c) Un émetteur radioélectrique.

Les sondes de radiovent (voir chapitre 13, Partie I) renferment aussi des dispositifs électroniques servant à la réception et à la retransmission des signaux de radionavigation ou un transpondeur radar.

Les radiosondes doivent généralement mesurer plusieurs éléments météorologiques. On a besoin de signaux de référence pour compenser l'instabilité de la conversion des signaux de sortie des capteurs en données de télémesure transmises. Il est donc nécessaire de passer d'un capteur et d'un dispositif de référence à l'autre selon un cycle établi. La plupart des radiosondes modernes sont munies de commutateurs électroniques très rapides, chaque cycle de mesure durant une à deux secondes. Grâce à cette

fréquence d'échantillonnage, on peut mesurer les variables météorologiques tous les cinq à dix mètres avec une vitesse normale d'ascension.

12.2.2 Alimentation électrique des radiosondes

Les piles utilisées doivent normalement pouvoir alimenter les radiosondes pendant toute la durée d'un vol, quelles que soient les conditions atmosphériques. En cas d'ascensions pouvant atteindre 5 hPa, elles doivent être d'une capacité suffisante pour pouvoir fournir le courant requis pendant près de trois heures, si l'on tient compte du fait que les lâchers sont souvent retardés et que l'ascension peut durer jusqu'à deux heures. Il faut en outre prévoir une alimentation adéquate pendant trois heures si la radiosonde transmet aussi des données au cours de la descente. Il est souhaitable que les piles soient aussi légères que possible, qu'elles puissent être stockées pendant longtemps et qu'elles soient inoffensives pour l'environnement après utilisation. De nombreux modèles récents de radiosondes tolèrent des variations importantes de la tension de sortie pendant le vol. Deux types de piles sont d'emploi courant: les piles sèches et les piles amorçables (par ajout d'eau).

L'avantage avec les piles sèches, c'est qu'on peut se les procurer partout et à très faible coût compte tenu de volumes de production très importants. Elles n'ont cependant qu'une durée de stockage limitée et, en service, la tension fournie peut varier davantage que celle des piles amorçables.

Les piles amorçables renferment généralement un mélange de chlorure de cuivre et de soufre. Il est possible de les stocker longtemps. La réaction chimique qu'entraîne leur amorçage par l'ajout d'eau produit de la chaleur, ce qui évite de devoir les isoler et contribue à stabiliser la température des composants électroniques de la radiosonde pendant le vol. Ne faisant pas l'objet d'une production de masse pour d'autres applications, ces piles sont habituellement fournies directement par les fabricants de radiosondes.

Il faut prendre soin de veiller à ce que les piles employées ne constituent pas un danger pour l'environnement quand la radiosonde retombe au sol, après que le ballon a explosé.

12.2.3 Méthodes de transmission des données

12.2.3.1 Émetteur radioélectrique

Les radiosondes sont équipées d'une grande variété de modèles d'émetteurs. Pour émettre à des fréquen-

ces atteignant jusqu'à 400 MHz, on fait principalement appel à des circuits à semi-conducteurs, tandis que pour émettre à 1 680 MHz, il est possible d'employer des oscillateurs à tube (à cavités). Les émetteurs actuels sont pilotés par quartz, ce qui assure une bonne stabilité des fréquences pendant le sondage. Cette stabilité pendant la manipulation au sol avant le lancement et pendant le vol est un facteur important. Les émetteurs de radiosondes qui fonctionnent à 400 MHz disposent en général d'une puissance de sortie inférieure à 250 mW, contre 330 mW environ pour le modèle le plus courant fonctionnant à 1 680 MHz. La modulation de l'émetteur varie d'un modèle de radiosonde à l'autre. Il serait préférable à l'avenir que les fabricants de radiosondes normalisent l'émission des données de la radiosonde à la station au sol. Dans tous les cas, dans de nombreuses régions dans le monde, les autorités chargées des radiocommunications exigeront à l'avenir le respect de certaines spécifications s'appliquant aux émetteurs de radiosondes, afin de réduire autant que possible l'utilisation du spectre radioélectrique pour que les bandes de fréquences radioélectriques attribuées aux aides météorologiques puissent être partagées avec d'autres utilisateurs (voir section 12.1.4.2).

12.3 CAPTEURS DE TEMPÉRATURE

12.3.1 Caractéristiques générales

Les meilleurs capteurs de température actuels réagissent suffisamment vite aux variations de température pour que l'erreur systématique produite par le décalage thermique pendant la montée demeure inférieure à 0,1 K dans une couche quelconque d'un kilomètre d'épaisseur. À une vitesse de montée normale, ce résultat est obtenu dans la plupart des lieux, à condition que la constante de temps des capteurs soit inférieure à une seconde dans la première partie du vol. Il faut également que les capteurs de température soient les moins sensibles possible aux erreurs causées par le rayonnement solaire, direct ou rétrodiffusé, ou par l'échange de chaleur dans l'infrarouge. On peut éviter les erreurs dues à l'infrarouge en enduisant les capteurs d'un revêtement à faible émissivité dans cette partie du spectre. Les revêtements blancs couramment employés autrefois avaient une émissivité élevée dans l'infrarouge. Aussi les mesures effectuées par les capteurs pouvaient-elles être entachées d'erreurs significatives attribuables à l'échange thermique (voir section 12.8.3.3).

Les capteurs de température doivent être suffisamment robustes pour résister aux secousses qui se produisent au moment du lancement et assez stables pour demeurer étalonnés pendant plusieurs années.

Il est souhaitable que l'étalonnage soit facile à reproduire, de manière à rendre inutile l'opération sur chaque capteur. Les principaux types de sondes de température d'utilisation courante sont les thermistances (semi-conducteurs résistifs en céramique), les capteurs capacitifs, les capteurs bimétalliques et les thermocouples.

La rapidité des capteurs est mesurée généralement sous la forme d'une constante de temps τ , selon la formule suivante (voir section 1.6.3, chapitre 1, Partie I) :

$$dT_e / dt = 1/\tau \cdot (T_e - T) \quad (12.3)$$

où T_e est la température du capteur et T la température vraie de l'air.

Ainsi, la constante de temps est le temps nécessaire pour réagir à 63 % à une variation brusque de la température. La constante de temps du capteur de température est proportionnelle à la capacité thermique et inversement proportionnelle au taux de transfert thermique par convection du capteur. La capacité thermique dépend du volume et de la composition du capteur, alors que le transfert thermique du capteur est lié à sa surface, au coefficient de transfert thermique et à la vitesse de la masse d'air circulant sur celui-ci. Le coefficient de transfert thermique ayant un faible lien avec le diamètre du capteur, les constantes de temps de capteurs de température constitués d'un matériau donné sont à peu près proportionnelles au rapport volume/surface du capteur. Pour obtenir une réponse rapide, il faut donc des capteurs minces de grande surface. La variation de la constante de temps en fonction de la vitesse massive de l'écoulement de l'air peut s'exprimer ainsi :

$$\tau = \tau_0 \cdot (\rho \cdot v)^{-n} \quad (12.4)$$

où ρ est la masse volumique de l'air, v la vitesse de l'air sur le capteur et n une constante.

- Note : Pour un capteur monté sur un bras au-dessus du corps de la radiosonde, v correspondrait à la vitesse d'ascension; mais la vitesse de l'air sur le capteur peut être inférieure à cette valeur lorsque celui-ci est placé dans un tube interne.

La valeur de n varie de 0,4 à 0,8 selon la forme du capteur et la nature de l'écoulement de l'air (laminaire ou turbulent). Le tableau 12.3 présente les constantes de temps d'anciens types de capteurs de température, à des pressions de 1 000, 100 et 10 hPa, pour une vitesse ascensionnelle de 5 m s⁻¹. Ces valeurs proviennent d'essais en laboratoire et d'essais de comparaison de radiosondes effectués avec des sondes à réponse très rapide en vol. Comme cela a déjà été indiqué, les capteurs capacitifs et les ther-

mistances perles actuels possèdent une constante de temps inférieure à 1 s à 1 000 hPa.

Tableau 12.3.
Constantes de temps types
des capteurs de température

Capteur de température	T à 000 hPa (s)	T à 100 hPa (s)	T à 10 hPa (s)
Thermistance cylindrique diamètre 1,3 mm	3	8	21
Thermistance perle moderne (valeurs générales)	< 1	< 3	< 7
Thermocondensateur perle diamètre 1,2 mm	2,5	6	15
Thermocondensateur filaire diamètre 0,1 mm	0,4	1	2,5
Capteur bimétallique	entre 5 et 8	entre 12 et 20	non disponible

12.3.2 Thermistances

Les thermistances (ou thermistors) sont généralement constituées de céramique dont la résistance varie en fonction de la température. Les capteurs ont une résistance élevée qui baisse avec la température absolue. La relation entre la résistance R et la température T peut s'exprimer à peu près ainsi :

$$R = A \cdot \exp(B/T) \quad (12.5)$$

où A et B sont des constantes. La sensibilité aux variations de la température est très élevée, mais la réponse à ces variations n'est pas du tout linéaire, car la sensibilité décroît approximativement en fonction du carré de la température absolue. Comme la résistance de la thermistance est très grande, de l'ordre des dizaines de milliers d'ohms, l'échauffement spontané dû à la tension appliquée au capteur est négligeable. Il est possible de fabriquer de très petites thermistances, ce qui permet d'obtenir des temps de réponse très courts. L'effet du rayonnement solaire sur une thermistance moderne type pavé est d'environ 1 °C à 10 hPa.

12.3.3 Thermocondensateurs

Les thermocondensateurs sont habituellement en céramique dont la constante diélectrique varie en fonction de la température. La céramique utilisée est souvent du titanate de baryum-strontium. Ce matériau ferroélectrique possède un coefficient de température du diélectrique de l'ordre de 10⁻²⁰ C⁻¹. Le coefficient de température est positif à des températures inférieures au point de Curie, et négatif au-dessus de ce point. Les capteurs actuels peuvent avoir un diamètre d'environ 0,1 mm. Ils mesurent les variations de capacité

entre deux fils de platine fins séparés par de la vitrocéramique (Turtiainen, Tammela et Stuns, 1995). Cela améliore leur rapidité et réduit les erreurs dues au réchauffement solaire à moins de 1 °C à 10 hPa.

12.3.4 Thermocouples

Un pays équipe aussi ses radiosondes de thermocouples cuivre-constantan pour mesurer la température dans une radiosonde nationale (OMM/TD-N° 303). En utilisant des filaments de 0,05 mm de diamètre pour former la soudure externe, on obtient une sonde à réponse très rapide. La relation existante entre la force électromotrice et la différence de température entre le capteur et sa référence est une relation physique connue. Le dispositif de référence du thermocouple est monté à l'intérieur de la radiosonde dans un milieu stable en température. Une résistance en cuivre mesure la température de référence. Pour obtenir des valeurs de température exactes, il faut également compenser la force électromotrice parasite introduite au niveau des jonctions additionnelles entre le capteur et les références internes.

12.3.5 Exposition

Pour obtenir la meilleure exposition possible, les capteurs de température doivent être placés au-dessus du corps principal de la radiosonde (sous le corps d'une catasonde). Ainsi, l'air chauffé ou refroidi au contact du corps de la radiosonde ou des supports du détecteur ne peut ensuite atteindre ce dernier. On monte généralement le capteur sur un bras ou un mât qui le maintient à la position voulue pendant le vol. Pour que la stabilité à long terme des mesures soit garantie, il importe que cette position puisse être reproduite sans variation d'un vol à l'autre. Afin d'obtenir une bonne exposition à faible pression, il faut que les supports et les connexions électriques du capteur soient assez minces pour rendre négligeables les erreurs de réchauffement ou de refroidissement imputables à la conduction thermique le long des connexions.

Quand on procède ainsi, les sondes de température sont exposées directement au rayonnement solaire et au rayonnement infrarouge atmosphérique. Les détecteurs captent le rayonnement solaire pendant les sondages diurnes et échangent en permanence le rayonnement de grande longueur d'onde avec le sol et le ciel. La grandeur des erreurs de rayonnement ne dépend que faiblement de la taille et de la forme des capteurs, puisque la taille des sondes a peu d'effet sur les coefficients de transfert thermique par convection. On peut donc réduire les erreurs de rayonnement avec de petits capteurs, à condition d'enduire ceux-ci d'un revêtement qui limite l'absorption des rayonnements solaire et de grande longueur d'onde, par exemple une couche mince

de métal. De nombreuses peintures blanches ayant un taux d'absorption élevé dans l'infrarouge ne sont pas recommandées pour les capteurs de radiosonde.

Un autre phénomène peut se produire avec ce type de montage au-dessus du corps de la radiosonde: le capteur a tendance à se recouvrir d'eau ou de glace pendant les précipitations ou en traversant les nuages. Il est extrêmement important que les capteurs soient protégés adéquatement contre ces nuisances. Le premier effet indésirable concerne l'évaporation de l'eau ou de la glace lorsque le capteur passe d'un nuage à une couche plus sèche, ce qui amène le dispositif sous la température ambiante vraie. De plus, l'absorptivité dans l'infrarouge d'un capteur de température qui est recouvert de glace pendant tout un vol diffère des valeurs normales. Ainsi, l'échange de chaleur infrarouge introduit dans les mesures une erreur systématique anormale, en particulier aux basses pressions.

Les capteurs bimétalliques et leurs supports absorbent une trop grande quantité de rayonnement pendant le jour pour être laissés sans protection au-dessus de la radiosonde. Il faut donc poser un écran spécial qui empêche le rayonnement d'atteindre le capteur directement ou après de multiples réflexions. Les surfaces internes de l'écran doivent demeurer à une température voisine de la température réelle de l'atmosphère et ne pas influer sur la température de l'air près du capteur. Le dispositif ne doit pas réduire la ventilation du capteur, ni emprisonner d'eau ou de glace pendant l'ascension à travers les nuages et les précipitations.

Un écran anti-rayonnement peut donner des résultats acceptables à des pressions élevées, mais il est difficile de satisfaire toutes les exigences lorsque les pressions sont basses. Pour bien absorber le rayonnement, les surfaces internes doivent être noircies, ce qui produit cependant un fort couplage avec les champs de rayonnement solaire et infrarouge. À basse pression, il s'ensuit un échauffement ou un refroidissement substantiel de ces surfaces par rapport à la température atmosphérique. Dans ces conditions, il devient rapidement impossible d'effectuer des mesures fiables de la température. Un compromis consiste à disposer de manière coaxiale deux cylindres en aluminium mince poli, avec un espacement de 1 ou 2 cm.

12.4 CAPTEURS DE PRESSION

12.4.1 Généralités

On exige des capteurs de pression qu'ils conservent leur exactitude sur une plage de mesure dynamique très étendue, soit de 3 à 1 000 hPa, avec une incerti-

tude de 0,1 hPa sur la presque totalité de cette plage et de 0,01 hPa à une pression inférieure à 100 hPa. Les variations de pression sont ordinairement décelées par une légère fluctuation électrique ou mécanique. Par exemple, la déformation maximale type d'une capsule anéroïde atteignant environ 5 mm, le transducteur utilisé doit traduire un déplacement approximatif de 0,5 µm. Il est par ailleurs nécessaire de compenser les modifications de l'étalonnage causées par les variations de température de la sonde pendant l'ascension. Ces variations peuvent être de l'ordre de plusieurs dizaines de degrés, à moins que le capteur de pression ne soit monté dans un milieu stable.

Ainsi, on installe généralement les capteurs de pression à l'intérieur du corps de la radiosonde afin de réduire au minimum les changements de température. Dans certains cas, le capteur est entouré de poches d'eau destinées à diminuer le refroidissement. Lorsque la radiosonde est munie d'une pile amorçable, la chaleur produite par les réactions chimiques sert à compenser le refroidissement interne. Toutefois, même dans ces conditions, il faut concevoir la radiosonde de manière à éviter les gradients de température au niveau du détecteur et des composants électriques qui lui sont associés. Si le capteur de pression se situe dans un milieu à température activement régulée, le dispositif doit être monté de façon à ne pas perturber les mesures de la température ou de l'humidité relative.

Le capteur de pression et son transducteur sont généralement conçus de manière à ce que la sensibilité augmente quand la pression baisse. La constante de temps des capteurs est la plupart du temps très faible et les erreurs de traînage (appelées aussi erreurs de vitesse) sont négligeables.

12.4.2 Capsules anéroïdes

Les capsules anéroïdes servent depuis longtemps de sondes de pression dans la majorité des radiosondes. Les anciens modèles de radiosondes renfermaient généralement des capsules de 50 à 60 mm de diamètre. Le coefficient d'élasticité du métal employé n'est pas fonction de la température. La déformation de la capsule est mesurée soit à l'aide d'un dispositif externe, ce qui exige une liaison mécanique entre celle-ci et le transducteur, soit par un dispositif interne (voir section 12.4.3).

La sensibilité de la capsule anéroïde dépend principalement de sa surface effective et de son élasticité. Les capsules sont conçues de manière à ce que leur déformation soit linéairement proportionnelle à la pression ou obéisse à d'autres lois, comme une progression logarithmique en fonction de la pression.

On procède habituellement au rodage de la capsule pour améliorer la stabilité de l'étalonnage à long terme. Pour cela, on soumet celle-ci à un grand nombre de cycles de pression et de température couvrant toute sa plage de fonctionnement.

Lorsque la capsule anéroïde est reliée mécaniquement à un transducteur, le capteur subit généralement un effet d'hystérésis d'environ 1 à 2 hPa. Il faut tenir compte de cet effet lors de l'étalonnage de la sonde. La variation de pression pendant l'étalonnage doit aller dans le même sens que lors des conditions de sondage réelles. La liaison mécanique avec le transducteur se compose souvent d'un système qui amplifie le mouvement de la capsule vers une aiguille actionnant des contacts de commutation ou des contacts résistifs. Pour obtenir de bons résultats, il importe de réduire au minimum le frottement afin d'éviter que l'aiguille ne se déplace de façon discontinue et qu'il y ait un effet d'hystérésis dans le système de détection.

12.4.3 Capsule anéroïde (capacitive)

De nombreux modèles de radiosondes modernes sont dotés de capsules anéroïdes de petit diamètre (30 mm maximum), dont les déformations sont directement mesurées par un condensateur interne plan formé de deux plaques fixées de part et d'autre de la capsule. La capacité C se définit comme suit :

$$C = \epsilon \cdot S/e \quad (12.6)$$

où S est la surface de chaque plaque, e la distance les séparant et ϵ la constante diélectrique. Comme e est directement fonction de la déformation de la capsule, la capacité C est la mesure électrique directe de cette déformation. Dans de nombreux capteurs, chaque plaque du condensateur est placée d'un côté de la capsule au moyen de fixations passant par les orifices de l'autre plaque. Avec cette configuration, e décroît en fonction de la pression. La formule de la sensibilité du capteur capacitif est la suivante :

$$-\epsilon \cdot S/e^2 \cdot de/dp \quad (12.7)$$

La sensibilité est maximale lorsque e est faible et que la pression est la plus faible. Le capteur capacitif décrit ici est plus compliqué à fabriquer, mais il convient mieux aux mesures en altitude, la sensibilité pouvant être 10 fois supérieure à 10 hPa qu'à 1 000 hPa. La capacité a généralement une valeur proche de 6 pF.

Les capsules anéroïdes capacitatives sont la plupart du temps raccordées à un oscillateur électronique résis-

tance-capacité avec les condensateurs de référence associés. Ce dispositif doit mesurer de très faibles variations de capacité (par exemple, 0,1 % pour un maximum de 6 pF) sans que l'oscillateur soit fortement perturbé par les fluctuations de température et d'alimentation électrique ou par le vieillissement. Il est difficile d'obtenir une telle stabilité avec un oscillateur peu coûteux. Une solution consiste à multiplexer l'entrée de l'oscillateur entre le capteur de pression et deux condensateurs de référence. Un condensateur de référence C_r est raccordé seul à l'oscillateur, puis en parallèle avec C_p , le condensateur du capteur de pression, et encore en parallèle avec un second condensateur de référence C_2 , afin d'offrir une référence complète.

L'étalonnage d'un capteur anéroïde capacitif dépend habituellement beaucoup de la température. Ce problème peut être compensé en ayant recours à un condensateur de référence externe dont la grandeur du coefficient de température est identique ou en appliquant des coefficients d'étalonnage d'usine lors du traitement des données au sol. La correction réalisée pendant le traitement sera liée à la température interne mesurée près du capteur de pression. En pratique, il peut être nécessaire de combiner ces deux techniques de compensation pour obtenir l'exactitude voulue.

12.4.4 Capteurs au silicium

Grâce à l'évolution rapide des techniques associées au silicium, il est maintenant possible de fabriquer des capteurs de pression fiables dans ce matériau. On forme une petite cavité à partir d'un orifice pratiqué dans une couche semi-conductrice épaisse. Cet orifice est recouvert d'une très mince couche de silicium pendant que la cavité est maintenue à très basse pression. La cavité fait ensuite office de capteur de pression, la pression atmosphérique étant mesurée par la déformation de la couche de silicium.

Cette déformation de la couche de silicium peut être détectée à l'aide d'un condensateur. La couche de silicium est recouverte d'une mince pellicule métallique, accompagnée d'une seconde couche métallique utilisée comme référence. On mesure la déformation par les variations de la capacité entre ces deux couches métalliques. Ce type de détecteur étant beaucoup moins sensible à la température que le capteur à jauge extensométrique, il est largement utilisé. La très petite taille de ces sondes permet d'éviter les erreurs d'étalonnage des capteurs anéroïdes capacitifs, causées par les fluctuations des gradients de température touchant les détecteurs et les dispositifs électroniques associés lors de la montée.

12.4.5

Utilisation d'observations géométriques de l'altitude au lieu d'observations par capteurs de pression

12.4.5.1 Généralités

Il est maintenant possible d'obtenir des observations géométriques de l'altitude à l'aide de radiosondes GPS capables de décoder les signaux des satellites de positionnement global, par opposition aux premières radiosondes GPS qui ne disposaient pas de cette capacité. Ces observations géométriques sont suffisamment proches de la réalité (à 10 ou 20 m près) pour permettre de déduire par le calcul la pression à tout moment au cours d'un vol, à partir de la pression en surface, de la température et de l'humidité relative. Les valeurs de la pression ainsi obtenues sont bien plus exactes que les mesures fournies par les meilleurs capteurs de pression à bord de radiosondes dans la stratosphère.

Quand on utilise un radar pour mesurer le vent, il est possible de remplacer les observations d'altitude obtenues grâce au capteur de pression par les mesures par radar, qui ne sont toutefois pas aussi exactes que celles que fournissent les radiosondes GPS. Les erreurs associées à l'altitude radar sont liées à l'installation et à l'étalonnage de chacun des radars. Il est par conséquent plus difficile d'obtenir des mesures de l'altitude géopotentielle et de la pression homogènes dans un réseau aérologique national qui utilise le radar comme outil de mesure de l'altitude que dans un réseau qui fait appel au GPS ou aux capteurs de pression pour cette mesure. L'élimination des capteurs de pression sur les radiosondes GPS permettrait de réduire considérablement le coût des radiosondes. Il est cependant nécessaire aussi de vérifier les nouvelles exigences des utilisateurs en ce qui concerne les modèles de prévision météorologique numérique non hydrostatique, puisque les mesures directes de la pression et de l'altitude géopotentielle dans la troposphère peuvent présenter un certain intérêt quand l'équilibre hydrostatique n'est pas représentatif des conditions atmosphériques.

12.4.5.2 Méthode de calcul

Les algorithmes servant à calculer l'altitude géométrique, à partir des observations de la distance oblique et du site effectuées par un radar de mesure du vent, ainsi qu'à convertir les altitudes géométriques en altitudes géopotentielles sont décrits dans la publication OMM/TD-N°175. La publication OMM/TD-N°451 présente l'algorithme utilisé avec les systèmes à radar secondaire russes. Si on remplace les observations des capteurs de pression par les observations de l'altitude radar, il faut corriger les données, afin de tenir compte des effets de la courbure de la Terre et de la réfraction des ondes radioélectriques, avant

de calculer la pression. On peut corriger l'effet de la réfraction à l'aide de moyennes saisonnières des profils atmosphériques, mais, pour obtenir les mesures de la pression les plus exactes qui soient, il peut être nécessaire de corriger les altitudes en fonction des conditions propres à chaque vol.

12.4.5.3 Sources d'erreur dans la détermination de l'altitude par radar

L'effet des erreurs d'observation radar sur la mesure du vent est étudié au chapitre 13 (Partie I). Les erreurs de site (aléatoires et systématiques) sont beaucoup plus importantes dans le cas des hauteurs. L'erreur systématique touchant la distance oblique est également plus critique pour les mesures de l'altitude que pour celles du vent. Les radars qui mesurent efficacement les vents produisent souvent des erreurs de site et de distance oblique qui empêchent d'obtenir des données d'altitude (et donc de pression) tout à fait exactes.

Les erreurs systématiques de site, faibles, mais non négligeables, peuvent provenir de sources diverses :

- a) Décentrage des axes de rotation de l'azimut et du site pendant la fabrication du radar. Pour éviter ce problème, la spécification d'acquisition doit clairement indiquer l'exactitude exigée ;
- b) Erreurs de mise à niveau du radar pendant l'installation et dans l'établissement de la référence de site nul dans le plan horizontal ;
- c) Écarts entre les axes électriques et mécaniques des antennes de poursuite, vraisemblablement introduits lors de la réparation ou du remplacement de composants électriques du radar.

Des erreurs peuvent provenir du système de transducteur qui mesure l'angle de site du radar à partir de la position mécanique de l'antenne de poursuite.

Les erreurs systématiques de distance oblique peuvent être imputables aux facteurs suivants :

- a) Retard dans le déclenchement du circuit distance-temps ou compensation incorrecte du

retard du signal dans le dispositif électronique de détection radar ;

- b) Erreur dans la fréquence de l'étalonner de distance.

Par conséquent, lorsqu'on utilise des systèmes de radiosondage sans capteurs de pression et que l'on se fie uniquement aux mesures de l'altitude, il faut vérifier et ajuster fréquemment les radars dans le cadre d'un programme régulier de maintenance des stations. Ces systèmes ne conviennent pas aux pays dans lesquels le soutien technique est limité.

12.5 CAPTEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE

12.5.1 Généralités

Le bon fonctionnement d'un capteur d'humidité relative repose sur l'échange rapide de molécules d'eau entre le capteur et l'atmosphère. Pour obtenir des données fiables dans l'ensemble de la troposphère, l'appareil doit avoir une résolution atteignant 1 % de tension de vapeur d'eau saturée pour des valeurs allant de 46 hPa à 30 °C à au moins 0,06 hPa à -50 °C. Au-dessous de 0 °C, il est nécessaire d'étonner les capteurs de manière à ce qu'ils mesurent l'humidité relative par rapport à une surface d'eau.

Les capteurs d'humidité relative les plus récents donnent des lectures assez identiques, à des températures supérieures à environ -70 °C, et indiquent une structure d'humidité relative similaire dans le plan vertical. Il est toutefois très difficile d'obtenir des résultats satisfaisants lorsque les températures et les pressions sont basses. Si l'échange de molécules d'eau entre le capteur et l'atmosphère est gêné par une chute de température pendant l'ascension, la contamination du détecteur attribuable aux concentrations élevées de vapeur d'eau enregistrées auparavant peut introduire une erreur systématique importante, aux températures les plus basses.

La constante de temps d'un capteur d'humidité relative augmente beaucoup plus rapidement, pendant

Tableau 12.4. Constante de temps des capteurs d'humidité relative τ (en secondes), en fonction de la température

Capteur	τ à 20 °C	τ à 0 °C	τ à -20 °C	τ à -30 °C	τ à -60 °C
Peau de batteur d'or	6	20	100	200	inutilisable
Hygristor au carbone	0,3	1,5	9	20	manque de fiabilité
Condensateur à film mince	0,3	1,5	9	20	entre 60 et 200 ^(*)

^(*) Voir les résultats dans Miloshevich et al. (2004)

la montée, que celle d'un capteur de température. Le tableau 12.4 présente les valeurs approximatives de cette constante pour les trois principaux types de détecteurs. Celles-ci ont été établies pour des variations d'humidité relative allant d'environ 70 à 30 %. Les constantes de temps des capteurs à peau de batteur d'or pour une température donnée sont beaucoup plus grandes lorsque l'humidité relative est très élevée ou très basse.

Les hygristors au carbone sont généralement montés dans un tube de protection, tandis que les capteurs à film mince sont la plupart du temps fixés à un bras et protégés des précipitations à l'aide d'une plaque. Lors d'essais comparatifs récents de radiosondes, il n'a pas été noté d'écart significatif entre les constantes de temps des modèles les plus courants de condensateurs à film mince, à des températures supérieures à -70 °C.

À des températures inférieures à -40 °C, la constante de temps des condensateurs à film mince est habituellement bien inférieure à celle des hygristors au carbone. Ce sont donc ces condensateurs qui équipent presque toutes les radiosondes modernes pour mesurer l'humidité relative. À des températures aussi basses que -60 °C, la constante de temps des condensateurs à film mince peut se situer aux alentours de deux minutes.

Les variations de la température influent sur l'étalonnage de la plupart des capteurs d'humidité relative. Des corrections doivent donc être apportées pendant le traitement des données au sol, si l'on veut que le degré d'exactitude annoncé à la température ambiante d'un laboratoire soit également vrai pour la plupart des mesures exécutées dans la troposphère.

La plupart des détecteurs d'humidité relative ont besoin d'être protégés contre la contamination causée par les précipitations survenant dans la première partie de la montée. L'évaporation de la contamination présente sur les plaques de protection, les surfaces internes du tube ou les supports du capteur au début du vol peut également provoquer des erreurs de mesure de l'humidité relative.

Aucun modèle de capteur d'humidité relative utilisé dans les radiosondes ne peut fournir de données fiables à basse température et à basse pression dans la stratosphère.

12.5.2 Condensateurs à film mince

Les capteurs capacitifs à film mince équipent maintenant la plupart des types de radiosondes les plus récents. Le fonctionnement du premier modèle utilisé

couramment reposait sur la variation de la constante diélectrique d'un film de polymère en fonction de la tension de la vapeur d'eau ambiante. L'électrode inférieure du condensateur était formée en gravant une plaque de verre métallisée (généralement 4 mm² de superficie et 0,2 mm d'épaisseur) et en la recouvrant d'une couche de polymère actif d'environ un micromètre d'épaisseur. L'électrode supérieure, perméable à la vapeur d'eau, était déposée sur la surface du polymère par évaporation sous vide. La capacité du capteur était fonction de l'humidité relative de manière quasi linéaire, les variations de la température influant peu sur l'étalonnage. Des recherches en laboratoire portant sur le rendement de ce type de détecteur ont montré que l'hystéresis était relativement faible (moins de 3 % d'humidité relative) tant que les électrodes n'étaient pas contaminées par les précipitations. Après plusieurs années d'utilisation, on a ajouté un revêtement mince à l'électrode supérieure afin de stabiliser les performances lors des ascensions humides. L'Humicap A de la radiosonde Vaisala RS80 présentait un biais négatif à des températures très basses, la courbe d'étalonnage manquant nettement alors de linéarité. Miloshevich et al. (2001) et Leiterer et al. (2005) ont proposé des corrections pour compenser cet effet.

Un nouveau capteur, l'Humicap H, a donc été fabriqué avec un polymère plus stable dans les conditions humides. Ce dispositif nécessitait un étalonnage polynomial de degré supérieur à celui du modèle précédent, mais ce traitement de données pouvait alors être pris en charge par les systèmes opérationnels au sol, entièrement automatisé pour la plupart. Même si ce capteur était plus stable dans des conditions humides, son bon fonctionnement pâtissait de la contamination occasionnée par le passage dans d'épais nuages à basse altitude.

Sur les modèles de capteurs d'humidité relative les plus récents de la marque Vaisala, la contamination par les nuages est éliminée par un échauffement périodique de l'appareil pendant le vol (Paukkunen, 1995). Pour que les capteurs à film mince donnent leur plein rendement, ils doivent être étalonnés avec soin en usine pour l'éventail complet des températures auxquelles ils seront exposés dans la troposphère. Miloshevich et al. (2004) ont donné quelques détails sur les différences de temps de réponse entre ces divers capteurs, différences étant surtout décelées à des températures très basses, près de la tropopause.

Depuis 1995, les utilisateurs sont conscients que les deux capteurs capacitifs les plus utilisés (l'Humicap A et l'Humicap H de Vaisala) peuvent présenter un biais négatif important, en raison d'une contamination chimique (voir par exemple Wang et al. (2002)).

Quand les radiosondes sont utilisées peu après leur livraison par le fabricant, leur étalonnage est juste, mais quand elles le sont après une période d'entreposage d'un an, il apparaît souvent une erreur systématique négative importante pouvant atteindre jusqu'à 11 % par forte humidité. C'est le styrène émis par le corps de la radiosonde qui est à l'origine de la contamination chimique. Les contrôles auxquels les radiosondes utilisées en exploitation ont été soumises ont montré que le degré de contamination varie. Ce problème de contamination chimique a perduré à des degrés divers alors que Vaisala avait modifié le conditionnement de ses radiosondes RS80. Les nouveaux capteurs de Vaisala pouvant être réchauffés par impulsion, il est possible d'éliminer toute contamination chimique en chauffant le capteur au cours de la vérification au sol avant de lancer la radiosonde.

12.5.3 Hygristors au carbone

Les hygristors au carbone sont composés d'un film hygroscopique renforcé par de fines particules de carbone. On utilise aussi maintenant une bande de polystyrène (de 1 mm d'épaisseur, de 60 mm de longueur et de 18 mm de largeur environ) enduite d'une mince pellicule hygroscopique renfermant des fibres de carbone. Les électrodes sont ainsi recouvertes de part et d'autre du capteur. Les variations de l'humidité relative ambiante modifient les dimensions du film, ce qui élève progressivement la résistance. À 90 % d'humidité relative, la résistance est une centaine de fois plus grande qu'à 30 %. Il est possible de corriger, pendant le traitement des données, les erreurs imputables aux variations de la température. Les capteurs sont ordinairement montés dans un tube situé à l'intérieur du corps de la radiosonde, de manière à réduire au minimum l'effet des précipitations et à éviter le réchauffement direct par le soleil.

Il est important que la fabrication de ce type de capteur soit bien contrôlée afin de ne pas avoir à déterminer individuellement la dépendance des appareils vis-à-vis de la température. Les hygristors sont normalement soumis, aux températures ambiantes de l'usine, à de nombreux cycles de rodage sur toute une plage de valeurs de l'humidité relative, dans le but de réduire l'hystérésis pendant la montée de la radiosonde. Au cours de la fabrication, il est possible de régler la résistance du capteur sur une valeur normalisée en grattant une partie du film de carbone. Ainsi obtient-on les données voulues en fonction de la valeur de résistance standard pour des conditions spécifiées et les détecteurs deviennent interchangeables sans autre étalonnage. Il faut conserver les capteurs dans leur emballage hermétique jusqu'au moment de l'utilisation et éviter de toucher la surface hygroscopique pendant l'insertion dans le sup-

port de la radiosonde. Il est difficile de fabriquer des capteurs présentant un étalonnage stable dans des conditions de forte humidité et la reproductibilité des mesures est souvent mauvaise quand l'humidité est faible.

12.5.4 Capteurs à peau de batteur d'or

Dans certains grands réseaux d'observation, on a encore recours aux capteurs à peau de batteur d'or (péritoine de bœuf). La dimension de la membrane varie de cinq à sept % pour une plage de valeurs d'humidité de 0 à 100 %. Il est possible d'obtenir des mesures utiles aux températures supérieures à -20 °C, mais la réponse du capteur devient extrêmement lente sous cette valeur (voir tableau 12.4). La peau de batteur d'or est fortement sujette à l'hystérésis après avoir été exposée à une faible humidité.

Le capteur est composé d'une seule épaisseur de membrane non vernie d'environ 0,03 mm, montée avec une tension approximative de 20 g cm⁻¹ en largeur, puis rodée dans un air saturé pendant plusieurs heures. Il est recommandé de conserver la peau dans un air saturé 20 minutes avant l'étalonnage et avant l'utilisation afin de réduire au minimum l'hystérésis. On étalonne le capteur en l'exposant à un cycle complet de conditions d'humidité relative (humides à sèches). Celui-ci doit être protégé contre la pluie pendant le vol.

La constante de temps du capteur est nettement supérieure aux valeurs présentées dans le tableau 12.4, lorsque l'humidité est très élevée ou très faible (McIlveen et Ludlam, 1969). Il est par conséquent difficile d'éviter les erreurs dans les mesures effectuées par les capteurs à peau de batteur d'or lors d'une ascension (biais négatif avec une humidité élevée, biais positif avec une humidité faible), même dans la basse troposphère.

12.5.5 Exposition

Pendant la montée des radiosondes, on observe fréquemment de rapides et importantes variations de l'humidité relative (supérieures à 25 %). Il importe que les utilisateurs puissent mesurer avec exactitude ces fluctuations. Pour donner de bons résultats, les capteurs doivent être bien ventilés et protégés, dans la mesure du possible, contre le dépôt d'eau et de glace sur leur surface et sur leur support et contre un réchauffement par le soleil.

Les capteurs de petite taille, notamment les condensateurs à film mince, sont ainsi positionnés sur un bras externe. Certains capteurs sont recouverts d'un petit capuchon protecteur et d'autres, réchauffés périodiquement pour éliminer la contamination par

l'eau ou la glace due à la traversée de nuages ou de brouillards. Le capuchon protecteur, ayant un effet primordial, il doit être étudié pour que le capteur d'humidité soit bien ventilé au cours de l'ascension de la radiosonde.

Les gros détecteurs sont normalement installés dans un tube interne ou dans un grand tube de protection situé sur le dessus ou le côté du corps de la radiosonde. Il convient de vérifier que ce tube laisse bien circuler l'air pour assurer la ventilation du capteur pendant l'ascension. Le tube doit évacuer le plus rapidement possible la glace et l'eau provenant des nuages et des fortes précipitations. Il doit également protéger le capteur contre le rayonnement solaire incident et une trop forte rétrodiffusion du rayonnement solaire. Il est nécessaire d'apporter une attention particulière à la conception de ce type de tubes si l'on veut éviter la contamination des capteurs dans les nuages élevés. Les plaques de protection et les revêtements des tubes ne doivent pas être hygroscopiques.

le fabricant ou ses agents, et non par les opérateurs, il est préférable d'opter pour un système intégré. En revanche, il est possible qu'un ensemble de modules puisse s'adapter plus facilement à différents modèles de radiosondes. On pourrait par exemple y ajouter des décodeurs sans acheter le reste de l'installation correspondant à chaque fabricant. Quand les opérateurs disposent de leur propre soutien technique et informatique, un ensemble modulaire peut être la meilleure solution. Les systèmes construits à partir de différents modules ont cependant posé des problèmes au cours des dix dernières années, car ils sont complexes à tester et qu'il est difficile d'adapter les logiciels de correction standard des différents fabricants à des systèmes de traitement non standard.

- Note : L'évolution de l'électronique moderne est si rapide qu'il deviendra difficile aux fabricants de systèmes intégrés d'assurer une assistance complète pendant plus de 10 à 15 ans. Il faut donc établir des cycles de remplacement de l'équipement d'environ 10 ans lorsqu'on planifie les dépenses à long terme.

12.6 ÉQUIPEMENT DES STATIONS TERRESTRES

12.6.1 Caractéristiques générales

La configuration exacte d'une station de radiosondage dépend du type de radiosondes utilisées, mais l'équipement au sol comprend toujours les éléments suivants :

- Une antenne et un récepteur radioélectrique destinés à capter les signaux provenant de la radiosonde ;
- Du matériel servant à décoder la modulation des signaux de radiosonde et à convertir ces derniers en unités météorologiques ;
- Du matériel destiné à présenter les mesures météorologiques à l'opérateur de sorte qu'il puisse transmettre, si nécessaire, les messages dont les utilisateurs ont besoin.

D'autres éléments peuvent s'ajouter pour la mesure du vent (par exemple, interface radar, dispositifs de poursuite Loran C ou GPS).

Les informations fournies par le décodeur sont généralement acheminées vers un ordinateur où elles sont stockées, traitées et corrigées.

L'équipement d'une station terrestre peut être constitué soit d'un système intégré acheté auprès d'un fabricant en particulier ou d'un ensemble de modules provenant de différentes sources. Si la maintenance doit être principalement assurée par

12.6.2 Logiciels de traitement des données

Les logiciels employés dans les stations terrestres de radiosondage sont beaucoup plus complexes que les programmes qui évaluent, par exemple, les altitudes géopotentielles des niveaux standard à partir de données exactes. Ils doivent éliminer les mesures de piètre qualité et effectuer des interpolations pour combler les données absentes. Il existe toujours le risque qu'un programmeur qui ne connaît pas suffisamment le domaine des radiosondes effectue des simplifications apparemment fondées, mais pouvant introduire des erreurs très significatives dans certaines circonstances. Par exemple, si la réception des signaux provenant de la radiosonde est mauvaise, il est dangereux de procéder à une trop grande interpolation à l'aide de techniques mathématiques qui deviennent instables lorsque la qualité générale des données laisse à désirer, mais qui sont assez stables lorsque cette qualité est bonne. Par ailleurs, on compense souvent certains problèmes de réception des signaux et les erreurs de pression survenant peu de temps après le lancement en ajustant l'indication horaire correspondant aux données reçues. Cela ne fausse pas beaucoup les mesures effectuées, mais il peut devenir presque impossible de vérifier le rendement des capteurs lors des essais de comparaison des radiosondes.

Il est essentiel d'avoir recours aux services d'un spécialiste ou d'un expert-conseil en radiosondage pour garantir le contrôle global de la conception du

logiciel¹. Il faut aussi faire appel à l'expérience d'un programmeur professionnel pour obtenir un logiciel efficace. Un tel logiciel doit renfermer des fonctions interactives et d'affichage qui répondent aux besoins opérationnels des opérateurs. Il doit être robuste et ne pas se bloquer facilement à la suite de manipulations erronées de la part d'opérateurs inexpérimentés. Au cours de la dernière décennie, il a fallu au moins deux ou trois années de travail, assorti d'essais par les Services météorologiques nationaux, pour mettre au point la plupart des logiciels utilisés dans les systèmes terrestres de radiosondage commerciaux. Ces essais, effectués par des opérateurs et un personnel très qualifiés, ont dû se poursuivre jusqu'à ce que le logiciel soit totalement fiable et utilisable facilement par un personnel ne possédant aucune compétence spéciale en informatique.

Le logiciel des stations terrestres doit être accompagné d'une documentation adéquate renfermant notamment une description claire des algorithmes employés². L'ensemble du système doit être conçu de manière à autoriser des simulations de sondage, aux fins d'essai et de comparaison. Des données brutes connues de pression, de température et d'humidité devraient être utilisées dans le but de vérifier la fiabilité des nouveaux logiciels. Ce sont souvent les erreurs de logiciel qui réduisent l'exactitude des données fournies par les meilleures radiosondes.

12.7 OPÉRATIONS DE RADIOSONDAGE

12.7.1 Corrections immédiatement avant l'utilisation

Il est recommandé de vérifier l'exactitude des mesures en atmosphère contrôlée avant le lancement de chaque radiosonde. Ces vérifications doivent avoir lieu quelques minutes avant le départ, quand la radiosonde est prête à être lâchée, afin d'empêcher l'envol d'appareils défectueux. Les contrôles peuvent également servir à améliorer l'exactitude de l'étalonnage en corrigeant les petites modifications qui ont pu survenir pendant l'entreposage et le transport vers l'aire de lancement.

On effectue habituellement les vérifications à l'intérieur, par exemple dans un caisson ventilé, à l'aide

¹ Recommandation 2 (CIMO-XII) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa douzième session (1998).

² Recommandation 2 (CIMO-XII).

³ Recommandation 9 (CIMO-XI) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa onzième session (1994).

de capteurs de température et d'humidité relative de référence possédant une exactitude conforme aux spécifications des utilisateurs. Il est possible de contrôler l'exactitude de la mesure de l'humidité relative suivant le degré d'hygrométrie ambiant et à des valeurs faibles et élevées, si nécessaire. Si l'on ne dispose pas de psychromètre de référence, on peut obtenir des degrés d'hygrométrie connus à l'aide avec des solutions salines saturées ou un gel de silice.

Les écarts observés entre les mesures effectuées par la radiosonde et les lectures de contrôle permettent d'ajuster les courbes d'étalonnage des capteurs avant le vol. Les capteurs servant à contrôler la radiosonde doivent être vérifiés régulièrement, afin d'éviter les dérives à long terme dans les erreurs d'étalonnage. En réglant l'étalonnage de la radiosonde au moyen du logiciel, on peut normalement améliorer la reproductibilité des mesures réalisées en vol. Le type d'ajustement nécessaire varie en fonction des causes de la dérive survenant après l'étalonnage initial à l'usine et en fonction du type de radiosonde.

Si les mesures de contrôle montrent de grandes divergences, il faut rejeter la radiosonde pour non-respect des spécifications du fabricant et la faire remplacer. C'est au moment de l'achat des radiosondes qu'il faut convenir avec le fabricant des valeurs maximales des écarts de mesures obtenus au cours des vérifications au sol.

Il est par ailleurs sage de contrôler les performances de la radiosonde, lorsque celle-ci est amenée sur l'aire de lancement. On doit vérifier, tout juste avant le lâcher, la concordance entre les données fournies par la radiosonde et les observations en surface réalisées à la station.

Compte tenu de l'importance de cette étape, la Commission des instruments et des méthodes d'observation recommande³ :

- a) De vérifier avant le lâcher, en milieu contrôlé, par exemple, dans un caisson d'étalonnage ou dans une installation de vérification de base, le fonctionnement des capteurs de pression, de température et d'humidité relative ;
- b) D'automatiser dans toute la mesure du possible les vérifications de base afin d'éliminer le risque d'erreur humaine ;
- c) De vérifier aussi les mesures de la température et de l'humidité relative en les comparant aux observations en surface ordinaires de ces éléments faites à la station immédiatement avant le lâcher ;
- d) De veiller à ce que les capteurs de référence présentent au moins le même degré d'exacti-

tude que celui exigé des capteurs de radiosondes et qu'ils soient étalonnés régulièrement en application des instructions du fabricant.

12.7.2 Méthodes de déploiement

Les radiosondes sont normalement fixées à des ballons dont la vitesse ascensionnelle est de 5 à 8 m s⁻¹, selon leurs spécifications et caractéristiques (voir chapitre 10, Partie II). Cette vitesse permet d'effectuer rapidement les mesures —40 minutes environ pour atteindre 16 km d'altitude et 90 minutes environ pour atteindre 30 km — de sorte que les informations peuvent être transmises sans tarder aux centres de prévision. La conception et l'emplacement des capteurs de température et d'humidité relative sont généralement pensés de manière à assurer une ventilation adéquate à une vitesse de montée d'environ 6 m s⁻¹. Les corrections des erreurs de température dues au réchauffement par le soleil ne sont ordinairement valables qu'aux vitesses ascensionnelles spécifiées.

Une radiosonde transmet des informations à une station terrestre habituellement fixe. L'évolution de la technologie a permis de réduire énormément la taille des systèmes terrestres entièrement automatisés. On peut donc les déployer facilement comme systèmes mobiles à bord de navires ou de fourgonnettes (ou remorques).

Les catasondes lâchées depuis un aéronef de recherche sont fixées à des parachutes qui en ralentissent la descente. Les capteurs de température sont montés sous la sonde. La vitesse de descente est souvent proche de 12 m s⁻¹, ce qui permet d'effectuer les mesures en un quart d'heure environ. À cette vitesse, l'aéronef peut lâcher un nombre suffisant de catasondes, avec un bon espacement dans le plan horizontal, pour la recherche à moyenne échelle (moins de 50 kilomètres). Les mesures transmises par la catasonde sont reçues et traitées à bord de l'aéronef. Les systèmes mis au point actuellement seront en mesure d'exécuter et de transmettre des lectures directes ainsi que de fonctionner automatiquement sous le contrôle d'un programme. On est par ailleurs en train d'élaborer des drones pour le largage des catasondes.

12.7.3 Procédures de lancement

Juste avant le lancement d'une radiosonde, il faut comparer les mesures météorologiques aux relevés en surface obtenus soit à l'intérieur, dans un caisson d'étalonnage, soit à l'extérieur, sous abri ventilé. Cette opération est nécessaire pour déceler les éventuels dommages subis par la radiosonde pendant le transport, les défauts de fabrication et les dérives de

l'étalonnage lors de l'entreposage. Les radiosondes qui produisent des erreurs de mesure dépassant les seuils précisés dans le contrat d'acquisition doivent être renvoyées au fabricant afin d'être remplacées.

Les radiosondes sont habituellement lâchées à la main ou au moyen d'un système d'aide au lancement, à partir d'un hangar ou d'un abri. La complexité des procédures de lancement varie selon le gaz utilisé pour gonfler le ballon (voir chapitre 10, Partie II) et selon la force et la direction des vents de surface sur le site. Lorsque les vents sont forts, les dérouleurs permettent de déployer lentement la ficelle de suspension de la radiosonde après le lancement. Les vents très forts obligent à dérouler la ficelle à des vitesses de seulement 0,5 ou 1 m s⁻¹.

Des systèmes automatiques de lancement sont vendus dans le commerce. Ils peuvent être avantageux dans les stations où le personnel n'est affecté qu'au fonctionnement des radiosondes, mais ils ne conviennent pas toujours aux emplacements très exposés, marqués par de très forts vents de surface.

Si les utilisateurs ont besoin de données précises sur la structure verticale de la couche limite atmosphérique, il faut réaliser les mesures de surface, qui seront reportées dans le message d'observation en altitude, dans un lieu proche de l'aire de lancement des radiosondes. L'emplacement de l'aire de lancement doit être représentatif des conditions de la couche limite relevées par le réseau synoptique de surface de la région. Il est souhaitable que l'opérateur (ou le système automatisé) effectue les observations en surface immédiatement après et non avant le lâcher du ballon. L'opérateur doit insérer des observations en surface dans le système au sol avant le lancement, car les conditions météorologiques peuvent changer en cas de retard important du lancement (par exemple, en cas d'éclatement du ballon ou de délai découlant du contrôle de la circulation aérienne).

Compte tenu du fait que les capteurs doivent être correctement ventilés pour fonctionner de façon fiable, il convient de bien aérer les radiosondes avant le lancement si l'on veut mesurer la structure verticale exacte de la couche limite atmosphérique. Quand il pleut, il est nécessaire de protéger les capteurs avant le départ, par exemple en utilisant un abri ventilé pour préparer la radiosonde.

12.7.4 Suspension de la radiosonde pendant le vol

Il ne faut pas suspendre la radiosonde trop près du ballon pendant le vol, car ce dernier biaiserait les mesures de la température et de l'humidité relative. Une traînée d'air, réchauffée au contact de la surface

du ballon pendant le jour et refroidie quelque peu la nuit, suit le ballon pendant son ascension. Le sillage peut être également contaminé par la vapeur d'eau présente à la surface du ballon après la traversée des nuages. La longueur de suspension nécessaire pour empêcher que les mesures ne soient trop perturbées varie en fonction de l'altitude maximale d'observation. Cela tient au fait que le sillage du ballon subit un réchauffement ou un refroidissement plus marqué quand les pressions sont très basses. Une longueur de suspension de 20 m peut suffire pour éliminer les erreurs significatives dans le cas de ballons ne montant qu'à 20 km. Toutefois, lorsqu'ils atteignent 30 km ou plus, on a plutôt besoin d'une longueur d'environ 40 m (voir, par exemple, OMM/TD-N° 588).

- **Note :** Quand on étudie l'effet du sillage des ballons sur les mesures effectuées, il est essentiel que les capteurs soient correctement exposés. Ceux-ci doivent être montés de sorte que l'air ayant été en contact avec d'autres surfaces de la radiosonde ne puisse les atteindre pendant la montée. Les sources de contamination par la chaleur ou la vapeur d'eau sont les suivantes: surfaces internes des tubes de protection, supports des capteurs et surfaces externes du corps de la radiosonde.

12.7.5 Sécurité du public

Les radiosondes doivent être conformes aux règlements de sécurité de la circulation aérienne quant à la taille, à la masse et à la masse volumique. Ces règlements visent à limiter les dommages en cas de collision avec un aéronef ou d'aspiration par un moteur. Dans de nombreux pays, l'organisme national chargé de la circulation aérienne émet des règlements régissant l'utilisation des ballons libres et exige l'enregistrement officiel des aires de lancement. À certains endroits, les lancements sont interdits ou soumis à l'approbation des contrôleurs de la circulation aérienne. Il faut se renseigner sur les formalités d'autorisation avant de choisir une nouvelle aire de lancement.

Les règlements de sécurité de certains pays exigent qu'un parachute ou tout autre moyen d'amortir la chute des instruments après l'éclatement du ballon soit fixé à la suspension de la radiosonde, en vue de protéger la population contre d'éventuelles blessures. Le parachute doit être en mesure de réduire la vitesse de descente près de la surface à moins de 6 m s⁻¹ environ. Les lambeaux du ballon qui restent accrochés après l'éclatement limitent habituellement la vitesse de chute à faible altitude. Il arrive toutefois que le ballon se détache presque entièrement, ce qui justifie l'utilisation d'un parachute pour freiner suffisamment la chute de la radiosonde.

Il importe que les radiosondes soient inoffensives pour l'environnement après leur chute sur la terre ferme ou en mer et ne présentent aucun danger si elles sont récupérées par le public ou un animal, ou laissées sur place.

12.8 ERREURS PROPRES AUX RADIOSONDÉS

12.8.1 Généralités

12.8.1.1 Types d'erreurs et références possibles

Cette section décrit en détail les erreurs produites par les capteurs des radiosondes. Les erreurs touchant au calcul de l'altitude géopotentielle ont été examinées dans la section 12.1.3.7.

Selon la note technique N° 140 de l'OMM (1975), il existe trois types d'erreurs de mesure :

- Les erreurs systématiques propres au type de radiosonde, d'une façon générale ;
- Les erreurs de sondage représentant les variations des erreurs qui persistent, d'un vol à l'autre, dans les couches épaisses verticales pour un type particulier de radiosonde ;
- Les erreurs aléatoires dans les observations, qui s'ajoutent aux erreurs de sondage au cours d'une ascension donnée.

Il est encore difficile de comparer les données de radiosondage à des références absolues. Les mesures d'altitude effectuées au moyen d'un radar de poursuite haute précision ou d'un GPS permettent toutefois de quantifier les erreurs systématiques dans les observations de l'altitude géopotentielle. On peut se servir de ces résultats pour connaître les erreurs systématiques touchant les mesures réalisées par les capteurs de pression, à condition que les erreurs de température soient relativement faibles.

Comme la plupart des radiosondes de conception récente mesurent les températures nocturnes avec une incertitude de ±0,2 K à une altitude de 30 km (OMM/TD-N° 1265), il est possible de déceler les erreurs systématiques entachant les mesures exécutées la nuit de sorte que celles-ci s'éloignent de ce degré d'incertitude. On ne peut toutefois comparer les températures diurnes avec la même certitude. À titre d'exemple, les valeurs moyennes de la température relevées au cours d'un seul et même essai font apparaître une incertitude de ±0,5 K à l'altitude de 30 km. Néanmoins, la technique des trois thermistances mise au point par la NASA offre une solution pour les mesures de la température diurne (Schmidlin, Sang Lee et Ranganayakama, 1995).

On peut vérifier les mesures de l'humidité relative dans des conditions d'humidité élevée, lorsque les radiosondes traversent des nuages à des températures supérieures à 0 °C. La structure verticale de l'humidité relative déterminée par radiosonde, y compris la présence de couches très sèches, peut être validée par rapprochement avec les mesures effectuées par lidar Raman.

Dans la plupart des essais de comparaison de radiosondes, on compare les résultats obtenus avec un modèle de radiosonde à ceux produits par un autre, afin d'évaluer leurs différences systématiques. La valeur des erreurs de sondage et celle des erreurs aléatoires peuvent être généralement estimées par le calcul des écarts types des différences entre les deux modèles de radiosonde. Les séries les plus complètes d'essais comparatifs réalisées depuis 1984 sont celles de la comparaison internationale OMM de radiosondes (OMM/TD-N° 195, 451 et 742) et des essais exécutés au Brésil (2001) et à Maurice (2005). Les résultats obtenus au cours de ces essais et d'autres encore respectant les mêmes normes et réalisés au Royaume-Uni, aux États-Unis d'Amérique et en Suisse sont cités dans les sections ci-après.

12.8.1.2 Sources d'erreurs indépendantes de la conception, de l'étalonnage et de l'exposition des capteurs

Il est extrêmement important de vérifier très soigneusement les radiosondes avant le vol, car les erreurs commises en mesurant les valeurs de contrôle servant à ajuster les étalonnages peuvent produire des erreurs de mesure importantes pendant la montée. Il faut également éviter les erreurs d'observation des données de surface obtenues à partir d'un abri standard, puis incluses dans le message de radiosondage. Une erreur dans l'évaluation de la pression de surface aura un effet sur le calcul de toutes les valeurs de l'altitude géopotentielle. Pour la même raison, l'observation de la pression de surface doit correspondre à l'altitude officielle de la station.

Avec les radiosondes modernes, les erreurs aléatoires sont généralement minimes. Cela tient à l'amélioration des éléments suivants: l'électronique des radiosondes, le multiplexage ainsi que la fiabilité des liaisons de télémesure avec la station terrestre et celle du traitement automatisé des données au sol. Ainsi, les erreurs aléatoires sont habituellement moins importantes que les erreurs systématiques des radiosondes ou que les variations, d'un vol à l'autre, des performances et de l'étalonnage des capteurs (erreurs de sondage). Les erreurs aléatoires peuvent toutefois devenir significatives lorsque survient une panne partielle de la radiosonde en vol, lorsqu'une interférence est provoquée par une autre radiosonde utilisant une fréquence de transmission similaire ou

quand la radiosonde se trouve à une distance oblique trop grande et à une altitude trop basse pour les spécifications du récepteur et des antennes au sol.

Les erreurs de mesure découlent donc non seulement de la conception des capteurs et des difficultés d'étalonnage en usine, mais également des problèmes de réception au sol des signaux de télémesure et de leurs effets sur le traitement des données qui s'ensuit. Lorsque la réception est mauvaise, le logiciel de traitement des données interpole souvent les valeurs situées entre les quelques mesures jugées valides. Il est alors essentiel que l'opérateur connaisse l'ampleur de l'interpolation touchant les observations. La piétre qualité des données peut forcer l'abandon du vol et la réalisation d'un nouveau lancement.

Dans les systèmes automatisés, les erreurs de logiciel se produisent fréquemment dans des circonstances particulières difficiles à déterminer sans procéder à une série d'essais. Elles sont habituellement attribuables à l'omission involontaire d'une procédure visant à faire face à une situation spéciale ou à une combinaison d'événements, procédure qui serait lancée intuitivement par un opérateur humain d'expérience.

12.8.2 Erreurs de mesure de la pression

Les erreurs systématiques et les erreurs de radiosondage (variations d'un vol à l'autre à deux écarts-types) ont été évaluées à partir des valeurs obtenues lors de la comparaison internationale OMM de radiosondes pour certains types d'appareils et à partir de celles recueillies lors d'essais connexes au cours desquels on s'est servi de radars pour vérifier les performances des capteurs de pression. Les résultats figurent dans le tableau 12.5. L'éventail des erreurs systématiques couvre la plupart du temps l'étendue des résultats obtenus sur plusieurs essais. Toutefois, on peut considérer que l'évaluation des erreurs est incertaine quand on n'a pas eu recours, lors d'un essai, à un radar pour contre-vérifier le rendement des capteurs de pression.

Afin de s'assurer de la stabilité de l'étalonnage, il a fallu soumettre les capsules anéroïdes à de nombreux cycles de pression, couvrant toute leur plage de fonctionnement, avant utilisation. Les corrections appliquées par le logiciel pendant le traitement des données, mais fondées sur les relevés de contrôle au sol effectués avant le lancement, ont permis de réduire en partie les erreurs. Les corrections basées sur les vérifications au sol suivaient cependant un schéma fixe sur toute la plage de fonctionnement. Dans la réalité, les modifications de l'étalonnage des capteurs de pression ont été plus variables. Ce fut notamment le cas avec un système utilisé cou-

ramment, dans lequel les corrections apportées par le logiciel n'ont éliminé que la moitié environ des fluctuations décelées par les contrôles avant le vol.

Les erreurs d'hystérésis pendant l'ascension sont en grande partie supprimées par l'étalonnage, mais elles deviennent importantes lorsqu'on utilise les observations pendant la descente, auquel cas il faut appliquer les corrections voulues. Il convient de réduire le plus possible les erreurs imputables au jeu présent dans les liaisons mécaniques. Si le détecteur de pression n'est pas à la température prévue, des erreurs systématiques surviennent quand on corrige les températures.

Les systèmes anéroïdes de base dont il est question dans le tableau 12.5 sont le modèle 1392 de VIZ (barocontacteur), figurant à titre de référence historique, et le système chinois SMG (liaison mécanique avec la radiosonde émettant en code). Les erreurs systématiques touchant l'ensemble des capteurs anéroïdes n'étaient pas toujours négligeables à cause, notamment, d'un mauvais étalonnage en usine, de problèmes inhérents à la vérification au sol de certains types de radiosondes et d'une compensation inadéquate de la température pendant la montée. Les erreurs de sondage se situent généralement entre 1 et 4 hPa. En comparant les résultats avec les altitudes radars, on voit que les anciens modèles de radiosondes dotés de capteurs semblables produisaient des erreurs plus grandes que celles indiquées ici.

Les radiosondes Vaisala RS80, VIZ MKII, Graw DFM-97 et Meisei RS2-91 sont toutes dotées de capteurs anéroïdes capacitifs, mais de modèles différents. Les erreurs de sondage de ces capteurs sont beaucoup

plus faibles que celles des autres types de capteurs anéroïdes, avec des valeurs généralement inférieures à 1 hPa à toutes les pressions. Les capsules anéroïdes capacitatives peuvent produire toutefois des erreurs systématiques importantes, en particulier lorsque la température interne de la radiosonde varie et que des gradients de température surviennent au niveau du capteur et des composants électroniques qui lui sont associés. L'erreur systématique peut être plus marquée que les variations de performance du capteur d'un vol à l'autre. Elle est généralement inférieure ou égale à $\pm 1,5$ hPa, aux pressions élevées, et inférieure ou égale à $\pm 1,0$ hPa, aux pressions très basses, mais elle est plus importante advenant un très gros choc thermique lors du lancement. Cela peut se produire dans les régions polaires si la radiosonde n'a pas le temps de s'acclimater aux conditions externes avant le lâcher.

La radiosonde Vaisala RS92 est équipée d'un capteur à puce de silicium et, n'étant pas sensible aux chocs thermiques, elle ne produit que de faibles erreurs systématiques.

Les erreurs indiquées pour le système MRZ dans le tableau 12.5 concernent les mesures dérivées des altitudes déterminées par des radars secondaires et non pas les mesures directes par des capteurs de pression. L'état d'entretien des radars russes comparés était optimal. L'altitude GPS indique la qualité des mesures de la pression exécutées lors de la comparaison OMM de radiosondes à Maurice par des radiosondes GPS capables de mesurer l'altitude à l'aide de signaux GPS. Il apparaît très clairement que ce type de radiosondes améliore l'observation de la pression par rapport au système de radar secondaire.

Tableau 12.5. Erreur systématique et erreur de radiosondage (d'un vol à l'autre) s'appliquant aux mesures de la pression exécutées par différents systèmes de radiosondage – Valeurs tirées de la comparaison internationale OMM de radiosondes et d'essais connexes

Type de radiosonde	Erreur systématique à 850 hPa (hPa)	Erreur systématique à 100 hPa (hPa)	Erreur systématique à 10 hPa (hPa)	Erreur de radiosondage à 850 hPa (hPa)	Erreur de radiosondage à 100 hPa (hPa)	Erreur de radiosondage à 10 hPa (hPa)
RS80, Vaisala	de 1,0 à 0,5	de -1 à -0,5	de -0,5 à 0	1	0,6	0,4
RS92; Vaisala	< 0,5	< 0,3	< 0,2	0,8	0,4	0,2
MKII, VIZ	de 0 à 1	de 0,7 à 1,1	de 0,3 à 0,7	1,6	0,6	0,4
RS2-91, Meisei	de 0,2 à 1	de 0,1 à 0,5	de -0,2 à 0,2	1	0,6	0,6
DFM-97, Graw	< ± 1	< 0,3	< 0,2	2	0,8	0,4
1392, VIZ	de -0,1 à 0,5	de -0,5 à 0,1	de -0,5 à -0,2	3,6	1,6	1
SMG (Chine)	de -3,3 à -1,8	de -2,5 à -0,8	de -1,3 à 0,5	5	3	2,6
MRZ (Fédération de Russie)	de -1,5 à -0,5	de -1,2 à -0,8	de 0 à 0,2	7	3,5	0,5
Altitude GPS	de -2 à 0	de -0,4 à 0	de -0,2 à 0	de 1 à 2	de 0,4 à 1	de 0,1 à 0,3

Tableau 12.6. Erreur systématique et erreur de radiosondage (2 écarts-types)
s'appliquant aux mesures nocturnes de la température exécutées par différents capteurs de température –
Valeurs tirées de la comparaison internationale OMM de radiosondes et d'essais connexes
(les performances de trois thermistances NASA-ATM étant utilisées comme référence arbitraire
pour l'évaluation des erreurs systématiques)

Capteur de température	Erreur systématique à 300 hPa (K)	Erreur systématique à 100 hPa (K)	Erreur systématique à 30 hPa (K)	Erreur systématique à 10 hPa (K)	Erreur de radiosondage à 30 hPa (K)	Erreur de radiosondage à 10 hPa (K)
Thermocondensateur, aluminé, RS80, Vaisala	de 0,2 à 0,5 ^a de 0,2 à 0,5 ^b de 0,9 à 1,2 ^c	de 0,2 à 0,5 ^a de 0,2 à 0,5 ^b de 1,0 à 1,3 ^c	de 0,2 à 0,5 ^a de 0,2 à 0,8 ^b de 1,0 à 1,3 ^c	de 0,3 à 0,8 ^a de 0,7 à 1,2 ^b de 1,0 à 1,5 ^c	0,2	0,4
Thermocondensateur à fil, aluminé, RS92, Vaisala	< 0,2	< 0,3	< 0,2	< 0,3	0,2	0,2
Thermistance tige, peinture blanche, VIZ	de -0,3 à 0,2	de -0,4 à 0,3	de -0,7 à 0,3	de -2,2 à -0,6	0,4	0,6
Trois thermistances NASA-ATM étalonnage VIZ	référence (arbitraire)	référence (arbitraire)	référence (arbitraire)	référence (arbitraire)	0,2	0,2
Thermistance à puce, aluminée, MKII, Sippican	< 0,2	< 0,3	< 0,2	< 0,3	0,2	0,4
Petite thermistance tige, peinture blanche, RS2-91, Meisei	de -0,3 à 0	± 0,2	± 0,2	de -0,4 à 0	0,2	0,4
Thermistance tige, peinture blanche, MRZ (Fédération de Russie)	0,2	0,2	-0,3	-0,8	1	1
Petite thermistance perle, peinture blanche, MODEM (régions tropicales)	de -0,4 à 0	± 0,2	de -0,5 à -0,8	de -1,6 à -1,8	0,5	0,9
Spirale bimétallique + écran anti-rayonnement, SMG (Chine)	0,2	0,2	-0,3	-1,8	0,8	2

(a) Températures RS80 non modifiées pendant le traitement des données, suivant le correctif V93.

(b) Températures RS80 modifiées pendant le traitement des données, suivant le correctif V86.

(c) Températures RS80 modifiées pendant le traitement des données, suivant le correctif V80.

Pour avoir une idée de l'effet des erreurs figurant dans le tableau 12.5 sur les températures transmises, il suffit de considérer qu'une erreur de 1 hPa produit, en moyenne, une erreur de -01 K à 900 hPa, de -0,3 K dans la haute troposphère (à 200 hPa sous les tropiques), de ±0,5 K à 30 hPa (variable suivant que les conditions sont estivales ou hivernales à environ 55 °N) et jusqu'à au moins 1 K dans la plupart des situations à 10 hPa.

12.8.3 Erreurs de mesure de la température

12.8.3.1 Étalonnage

Le tableau 12.6 récapitule les performances nocturnes relatives des capteurs de température, évaluées

lors de la comparaison internationale OMM de radiosondes et d'essais connexes. Les résultats représentent les performances moyennes types déterminées à partir d'au moins 15 vols d'essai. On a utilisé comme référence arbitraire les mesures effectuées à l'aide de trois thermistances à tige NASA-ATM étalonnées par la société VIZ et présentant une incertitude de mesure probablement d'environ 0,2 K. Lorsque l'erreur systématique d'un capteur se présente sous la forme d'un intervalle, cet intervalle correspond à l'étendue des écarts décelés lors d'une série d'essais.

Les erreurs d'étalement qui surviennent pendant une ascension peuvent découler des erreurs d'étalement en usine. Il peut également se produire de

légères modifications dans le capteur ou dans les contacts électriques du capteur, ainsi que des instabilités au niveau du système de transducteur de la radiosonde et des dispositifs de référence pendant l'entreposage ou la montée. On peut généralement corriger en partie, pendant le traitement des données, la dérive des capteurs et des transducteurs survenue lors de l'entreposage, en procédant à des ajustements fondés sur les vérifications au sol avant le vol. Dans le tableau 12.6, les écarts entre les capteurs aluminés (c'est-à-dire ceux de la RS80 de Vaisala sans correction logicielle, de la RS92 de Vaisala, de la RS2-91 de Meisei et de la MKII de Sippican) et le dispositif de référence seraient le résultat direct d'erreurs d'étalonnage ou de légères instabilités au niveau des branchements électriques des capteurs.

Le tableau 12.6 n'indique que les erreurs de radiosondage survenant à des pressions de 30 et 10 hPa, car ce type d'erreurs varie peu entre la surface et 30 hPa avec la plupart des capteurs de température modernes.

12.8.3.2 Décalage thermique

La plupart des capteurs de température employés couramment (sauf les résistances à fil mince, les thermocouples et les très petits modèles de thermistances ou de thermocondensateurs) ont des constantes de temps assez élevées pour nécessiter des corrections, si l'on recherche le maximum d'exactitude. Les erreurs dues au décalage thermique ϵ_τ , avec une vitesse ascensionnelle V et un gradient de température uniforme dT/dz , pour un capteur présentant une constante de temps τ se définissent comme suit :

$$\epsilon_\tau = -\tau \cdot V \cdot dT/dz \quad (12.8)$$

Dans la basse troposphère, $V \cdot dT/dz$ se situe souvent aux environs de $-0,03 \text{ K s}^{-1}$. Une constante de temps de 3 s donne alors des erreurs de décalage d'à peu près $0,1 \text{ K}$. Dans la haute troposphère, $V \cdot dT/dz$ est évaluée en moyenne à $-0,05 \text{ K s}^{-1}$ et une constante de temps de 5 s produit des erreurs d'à peu près $0,25 \text{ K}$. À des pressions beaucoup plus basses, près de 10 hPa, $V \cdot dT/dz$ dans une couche d'un kilomètre d'épaisseur correspond à environ $0,015 \text{ K s}^{-1}$. Une constante de temps de 18 s provoque des erreurs approximatives de $-0,3 \text{ K}$ pour la température moyenne de la couche. Les gradients de température peuvent excéder 4 K par 100 mètres quand les inversions de température sont marquées. Ainsi, pendant de brèves périodes d'une ascension, les erreurs de température sont susceptibles d'être beaucoup plus élevées que les valeurs données plus haut pour les couches d'un kilomètre d'épaisseur.

Les constantes mentionnées dans le paragraphe précédent sont typiques des capteurs employés couramment. Les capteurs bimétalliques et les thermistan-

ces dont la Russie s'est servie lors de la comparaison OMM de radiosondes présentent des constantes de temps parfois deux fois plus élevées que celles-ci.

12.8.3.3 Échange thermique radiatif dans l'infrarouge

De nombreuses peintures blanches employées pour recouvrir les capteurs ont une émissivité relativement élevée dans l'infrarouge ($> 0,8$). L'échange thermique avec l'infrarouge est donc susceptible d'introduire des erreurs significatives dans les mesures de la température. Le flux infrarouge ascendant qui atteint le capteur se compose d'émissions provenant de la surface et des couches atmosphériques situées sous la radiosonde. Le flux infrarouge descendant, souvent beaucoup plus faible, est constitué d'émissions atmosphériques issues des couches surplombant l'appareil. Ces flux évoluent à mesure que la radiosonde monte. Pour une structure verticale de température donnée, les flux infrarouges varient sensiblement d'un vol à l'autre, selon le type de nuage présent à proximité du trajet.

Si le rayonnement infrarouge émis par le capteur est compensé par l'absorption des flux infrarouges provenant de l'atmosphère, le capteur se trouve en équilibre radiatif et fournit une lecture correcte. Lorsque la nébulosité est faible, les températures d'équilibre baissent quand la radiosonde monte. Dans la stratosphère, la température d'équilibre radiatif se situe souvent aux environs de -60°C , quand il y a peu de nuages élevés et moyens, même si les valeurs précises varient en fonction de la température en surface, de l'état de la surface et de l'humidité troposphérique. Ainsi, les erreurs dues à l'infrarouge sont généralement faibles lorsque les températures stratosphériques avoisinent -60°C .

Les erreurs attribuables à l'infrarouge touchent à la fois les observations diurnes et les observations nocturnes, mais nous n'examinerons ici que les mesures effectuées la nuit afin de faciliter l'analyse. L'effet des erreurs systématiques produites par les thermistances blanches dans les moyennes climatologiques est fonction de la température moyenne de l'air et fluctue donc avec la latitude et la nébulosité moyenne dans les grands réseaux nationaux. On peut constater au tableau 12.6 les effets des erreurs associées à l'échange thermique infrarouge s'appliquant aux mesures nocturnes fournies par les thermistances VIZ, MODEM et russes. À haute pression, ces capteurs donnent des températures proches des valeurs de référence, tandis qu'à faible pression, les températures mesurées sont beaucoup plus basses. À moins de 30 hPa dans les essais en question, la température d'équilibre radiatif nocturne était généralement beaucoup plus faible que les températures atmosphériques. Cela signifie que le rayonnement

infrarouge émis par le capteur de température excédait le rayonnement infrarouge absorbé, en provenance des couches atmosphériques, refroidissant ainsi le capteur sous la température réelle.

Quand les températures atmosphériques sont très basses, la température d'équilibre radiatif nocturne peut dépasser celles-ci. Le capteur de température émet alors moins de rayonnement qu'il n'en absorbe et donne des lectures trop élevées. Dans les régions tropicales, on peut s'attendre à des erreurs positives d'au moins 0,5 K, avec des températures inférieures à -80 °C dans les couches proches de la tropopause, en particulier lorsqu'il y a peu de nuages élevés. Lors des essais effectués dans les îles Britanniques, on a observé des erreurs positives excédant 0,5 K, à des pressions inférieures à 30 hPa et avec des températures atmosphériques situées sous les -75 °C. Des capteurs similaires ont présenté des erreurs d'environ -1,7 K à 10 hPa, pour des températures de -40 °C.

Le tableau 12.6 montre que les thermistances à tige blanches présentent des erreurs systématiques nocturnes plus variables et des erreurs de radiosondage plus importantes que les capteurs des radiosondes RS80 et RS92 de Vaisala et MKII de Sippican. Cela est principalement attribuable aux fluctuations, d'un essai à l'autre, des erreurs causées par l'échange thermique infrarouge, et non pas à des modifications plus marquées des étalonnages en usine. Dans un essai réalisé au Royaume-Uni, au cours duquel la structure de la température atmosphérique a peu varié dans le temps (OMM/TD-N° 588), les erreurs produites par les thermistances à tige blanches ont augmenté d'une valeur allant jusqu'à 0,5 K en raison de variations de nébulosité à l'étage haut. L'environnement infrarouge évolue tellement, d'un vol à l'autre, en fonction de la nébulosité et de la température en surface qu'il est très difficile de corriger les erreurs produites lors d'un vol donné sans faire appel à un modèle de transfert radiatif complet.

L'échange thermique infrarouge influe également sur les mesures effectuées par les capteurs montés dans des tubes ou munis d'écrans anti-rayonnement, lorsque les surfaces internes des conduits sont peintes en noir. Les surfaces noires sont refroidies ou réchauffées par le rayonnement infrarouge de la même manière que les capteurs peints en blanc décrits plus haut. La température de l'air traversant le tube est modifiée au contact des surfaces noires. Une partie de cet air parvient au capteur de température. Les erreurs produites semblent être du même signe et de la même grandeur que les erreurs des thermistances à tige blanches (voir par exemple les erreurs du capteur bimétallique chinois SMG, au tableau 12.6).

12.8.3.4 Réchauffement par rayonnement solaire

Tous les capteurs de température équipant les radiosondes produisent, pendant les vols diurnes, des erreurs dues au réchauffement causé par le rayonnement solaire incident. On n'a pas encore réussi à mettre au point des écrans anti-rayonnement et des revêtements réflecteurs entièrement efficaces. Il est donc impossible d'ignorer les erreurs systématiques imputables au rayonnement solaire qui parvient aux capteurs directement ou après de multiples réflexions à l'intérieur de la protection anti-rayonnement. Dans la plupart des systèmes modernes, le logiciel corrige les données pendant le traitement afin de compenser le réchauffement. Ces corrections sont généralement établies à partir d'études spéciales des écarts de température journal (qui tiennent compte des variations diurnes réelles de la température causées par les marées atmosphériques), couplées à des modèles du réchauffement par le soleil. Elles sont ensuite exprimées en fonction de la hauteur du soleil pendant l'ascension. Les corrections peuvent également tenir compte de la vitesse ascensionnelle réelle, car les erreurs attribuables à la ventilation et au réchauffement varient changent lorsque cette vitesse diffère des conditions d'essai standard. Les erreurs dues au réchauffement sont extrêmement sensibles aux variations de la hauteur du soleil quand celle-ci est faible (moins de 10°). Par conséquent, si le logiciel ne modifie pas la hauteur du soleil pendant le vol, des erreurs significatives se produiront lors de la correction des vols qui ont eu lieu durant le lever ou le coucher du soleil.

Un correctif logiciel simple ne peut être efficace que dans certaines conditions de nébulosité et de surface et ne peut convenir à tous les vols; par exemple, les radiosondes lancées à partir du littoral ont tendance à se diriger vers la mer. Par temps clair, le faible albédo de la surface de la mer réduit le rayonnement solaire rétrodiffusé d'un facteur de deux ou trois par rapport aux conditions atmosphériques moyennes. Dans ces circonstances, les corrections prévues seront trop importantes d'au moins 20 %. Par contre, lorsque la radiosonde traverse des nuages élevés épais ayant un albédo très élevé, la rétrodiffusion risque d'être beaucoup plus grande qu'à l'habitude et le logiciel sous-évaluera la correction nécessaire.

Le tableau 12.7 présente les écarts de mesure entre le jour et la nuit produits par les radiosondes les plus courantes. Il s'agit soit des valeurs employées dans les correctifs logiciels, soit des valeurs réelles dérivées des essais de comparaison des radiosondes qui incluaient des comparaisons avec les mesures effectuées à l'aide des trois thermistances NASA-ATM. Les valeurs réel-

Tableau 12.7. Écarts de température jour-nuit produits par différents types de capteurs et évaluation des erreurs de radiosondage s'appliquant à la mesure diurne de la température (2 écarts-types), pour des hauteurs du soleil supérieures à 20°

Capteur de température	Écart systématique jour-nuit à 300 hPa (K)	Écart systématique jour-nuit à 100 hPa (K)	Écart systématique jour-nuit à 30 hPa (K)	Écart systématique jour-nuit à 10 hPa (K)	Erreure de radiosondage diurne à 30 hPa (K)	Erreure de radiosondage diurne à 10 hPa (K)
Thermocondensateur, aluminé, RS92, Vaisala	0,15	0,3	0,4	0,6	0,3	0,6
Thermocondensateur, aluminé, RS80, Vaisala	0,9	1,3	2,2	2,8 ^b	0,6	1
Thermistance à puce, aluminée, Sippican	0,5	0,7	1,1	1,3	0,3	0,6
Thermistance tige, peinture blanche, VIZ ^a	0,4	1	1,6	2,5	0,8	1,2
Petite thermistance tige, peinture blanche, RS2-91, Meisei	0,6 ^b	1,3 ^b	2,0 ^b	2,5 ^b	0,9	1,3
Thermistance tige, peinture blanche, MRZ (Fédération de Russie)	1 ^b	1,8 ^b	3,3	5,1	1,2	1,4
Spirale bimétallique + écran anti-rayonnement, SMG (Chine)	0,8 ^b	1,3 ^b	3,4 ^b	9,9 ^b	1,4	3

(a) Les mesures ne sont généralement pas corrigées par le logiciel avant d'être transmises aux utilisateurs, à partir de mai 1996.

(b) Valeurs du correctif logiciel utilisé lors de la comparaison internationale OMM de radiosondes; les autres valeurs sont des estimations obtenues à partir de comparaisons directes avec les mesures exécutées à l'aide des trois thermistances NASA-ATM.

les comparées aux mesures NASA présenteraient une incertitude de 0,2 K, pour des pressions élevées, et de 0,3 K, dans des conditions de faible pression.

Les correctifs logiciels normalisés décrits plus haut présentent une incertitude de 20 %, à cause des variations possibles du rayonnement rétrodiffusé dues aux modifications de la nébulosité et de l'albédo de surface. L'incertitude associée aux erreurs systématiques corrigées pour tenir compte du réchauffement par le rayonnement solaire est d'au moins 0,2 K à 100 hPa et d'au moins 0,5 K à 10 hPa, avec la majorité des capteurs d'ancienne génération cités dans le tableau 12.7. Les thermistances à puce de la Vaisala RS92 et de la radiosonde de marque Sippican sont entre deux et quatre fois moins sensibles au réchauffement par le rayonnement solaire que les meilleurs capteurs d'ancienne génération figurant dans le tableau 12.7. Ces nouveaux capteurs sont en effet plus petits et possèdent un temps de réponse plus court, tout en conservant la faible absorptivité dans le visible des appareils précédents.

Les systèmes russe et chinois exigent des corrections plus importantes à basse pression que les autres

systèmes. De nombreux types de radiosondes employées avant 1980 avaient des caractéristiques d'erreurs semblables à celles du capteur chinois. Les plus grandes erreurs dues au réchauffement introduites par les anciens modèles de radiosonde étaient attribuables à l'emploi de détecteurs et de supports ayant un plus grand pouvoir d'absorption dans le visible que la plupart des capteurs modernes. Ces modèles avaient besoin d'écrans anti-rayonnement. Au cours de la montée, les radiosondes oscillent et tournent comme un pendule suspendu au ballon; l'air qui se réchauffe au contact des supports de capteurs, des surfaces internes des écrans anti-rayonnement ou du corps de la radiosonde parvient de temps à autre aux capteurs montés sur l'écran. Ce réchauffement indirect augmente rapidement avec la baisse de la pression dans la stratosphère.

Le réchauffement de la plupart des capteurs par le soleil fluctue également de manière sensible selon l'orientation du capteur par rapport au soleil. Les variations, d'un vol à l'autre, de l'orientation et du rayonnement rétrodiffusé causent des erreurs de radiosondage plus marquées le jour que la nuit, pour tous les types de radiosondes. Par ailleurs, beau-

coup de fabricants ne positionnent pas le capteur de température au-dessus des supports qui l'entourent. Quand la radiosonde tournoie en vol, dans certaines positions, l'air se réchauffe au contact de ces supports avant de parvenir jusqu'au capteur, ce qui produit des impulsions positives dans les valeurs de la température transmises par la radiosonde. Ces impulsions peuvent atteindre jusqu'à 1 °C à 10 hPa. Il est facile de les déceler quand les radiosondes sont montées sur les dispositifs d'essai employés au cours des comparaisons OMM de radiosondes, puisque celles-ci tournent alors en vol de façon régulière. Dans une telle situation, le filtrage des données brutes permet d'éliminer dans une certaine mesure les erreurs positives dues à ce phénomène.

12.8.3.5 Dépôt de glace ou d'eau sur le capteur

Les dépôts de glace ou d'eau sur le capteur de température constituent aussi une source d'erreur. Ce phénomène provoque le refroidissement psychrométrique du capteur (par l'effet du thermomètre mouillé), dès que l'humidité relative de l'atmosphère est inférieure à 100 %. Si les précipitations ne peuvent être rapidement éliminées et que le capteur reste longtemps couvert d'eau ou de glace, une grande partie des mesures effectuées pendant la montée peuvent être corrompues. Un appareil aluminé recouvert d'une couche de glace la nuit réagit comme un capteur noir dans l'infrarouge, subissant alors un refroidissement important à basse pression, dans la plupart des conditions.

Par ailleurs, si l'eau déposée sur le capteur gèle lorsque la radiosonde traverse des couches d'air plus froides, la chaleur latente dégagée élève la température aux environs de 0 °C. Si un capteur recouvert de glace atteint des couches plus chaudes, la température ne peut dépasser 0 °C avant que la glace n'ait fondu. Lorsqu'on obtient une température proche de 0 °C pour une couche isotherme, dans des conditions humides, il faut considérer cette valeur avec prudence.

12.8.4 Erreurs de mesure de l'humidité relative

12.8.4.1 Étalonnage

Les erreurs s'appliquant aux mesures de l'humidité relative peuvent être causées par des modifications de l'étalonnage pendant l'entreposage. Ce genre de problème touche généralement davantage les capteurs d'humidité relative que les capteurs de température ou de pression. Il faut suivre scrupuleusement les instructions du fabricant concernant l'entreposage des capteurs et les préparatifs avant l'utilisation.

En cours de fabrication, l'étalonnage de chaque capteur n'est souvent réalisé qu'à un ou deux paliers d'humidité relative et, parfois, pour une seule température (voir, par exemple, Wade, 1995). Dans de nombreux cas, on ne vérifie pas individuellement, ou par lot, la dépendance de l'étalonnage par rapport à la température; on suppose là encore que celle-ci est conforme aux courbes déterminées lors d'un nombre limité d'essais. D'un lot à l'autre de capteurs, l'étalonnage varie fréquemment de plusieurs points de pourcentage d'humidité relative, comme cela apparaît dans les mesures effectuées dans les nuages bas (Nash, Elms et Oakley, 1995). Cela peut être imputable à de mauvaises procédures d'étalonnage en usine. Par exemple, les performances réelles des capteurs d'un lot donné peuvent être différentes des courbes d'étalonnage normalisées, ajustées aux vérifications de l'humidité pré-établies. Il peut aussi s'agir d'une variation de la stabilité des capteurs, d'un même lot, pendant l'entreposage.

Le tableau 12.8 présente les écarts systématiques produits par les capteurs les plus courants testés lors de la comparaison internationale OMM de radiosondes. On trouvera des résultats plus détaillés sur des essais antérieurs dans Nash, Elms et Oakley (1995). Au cours des essais réalisés avant 2000, les données conservées se limitaient aux vols au cours desquels les radiosondes ne traversaient pas de nuages bas. Ainsi les capteurs ne pouvaient avoir été mouillés ou contaminés par les précipitations. Lors d'essais plus récents, comme la majorité des capteurs avaient montré une meilleure stabilité ou étaient protégés par rapport à la contamination par les nuages, il a été possible de combiner les résultats obtenus dans la plupart des conditions. Les résultats fournis ici ne concernent que les vols nocturnes, car on a voulu éliminer les complications associées au réchauffement par le rayonnement solaire.

Seules les données correspondant à des températures supérieures à -20 °C ont été considérées dans les comparaisons du tableau 12.8. Les constantes de temps du condensateur à film mince et de l'hygristor au carbone sont identiques et assez rapides pour éviter les erreurs systématiques significatives dues à un temps de réponse trop long. Les capteurs à peau de batteur d'or réagissent plutôt bien aux variations rapides de l'humidité relative à ces températures. Les temps de réponse très longs à des valeurs d'humidité élevées et faibles contribuent toutefois aux écarts systématiques qui apparaissent dans le tableau 12.8.

On s'est servi des performances de l'Humicap A de la radiosonde Vaisala RS80 comme référence arbitraire afin d'établir un lien avec les essais antérieurs; au cours des essais plus récents qui se sont déroulés au Brésil et à Maurice, on a aussi utilisé l'hygromètre

Tableau 12.8. Écarts systématiques et erreurs de radiosondage (2 écarts-types) produits la nuit par différents capteurs d'humidité relative (à l'exception des ascensions avec traversée de nuages bas) pour des températures supérieures à -20 °C – Valeurs tirées de la comparaison internationale OMM de radiosondes et d'essais connexes

Capteur d'humidité	Écart systématique (80-90 % HR) (% HR)	Écart systématique (40-60 % HR) (% HR)	Écart systématique (10-20 % HR) (% HR)	Erreurs de radiosondage (80-90 % HR) (% HR)	Erreurs de radiosondage (40-60 % HR) (% HR)	Erreurs de radiosondage (10-20 % HR) (% HR)
Condensateur à film mince, RS80, Vaisala, Humicap A (air sec)	-2 (présumé)	-1 (présumé)	2 (présumé)	6	6	4
Condensateur à film mince, RS80, Vaisala, Humicap H (air sec)	-1	0	0	6	6	4
Condensateur à film mince, réchauffé par impulsion, RS92, Vaisala, (toutes conditions)	de 0 à -2	0	0	de 2 à 4	de 2 à 6	3
Condensateur à film mince, RS2-91, Meisei (toutes conditions)	de -9 à 2	de -2 à 5	-2	6	de 6 à 8	6
Hygristor au carbone, MKII, VIZ (toutes conditions)	de 4 à 10	de -4 à 4	de -20 à 10	10	de 4 à 16	de 6 à 20
Condensateur à film mince, MODEM (toutes conditions)	de 0 à 8	de 0 à 7	de 0 à 5	de 4 à 8	de 3 à 8	de 4 à 8
Hygristor au carbone, 1392, VIZ (air sec)	4	-3	12	8	8	12
Capteur à peau de batteur d'or, Russie + R.-U. (air sec)	-8	-1	9	12	18	16

«Snow White» à miroir refroidi comme étalon de travail. Pour l'Humicap A de la radiosonde RS80, les erreurs ont été déduites des résultats d'essais effectués en laboratoire sur un nombre limité de capteurs et de la qualité des mesures opérationnelles dans les nuages bas. Il serait risqué de supposer que le rendement moyen de la référence arbitraire se situait à moins de $\pm 3\%$ d'humidité relative des erreurs absolues réelles dans les mesures des radiosondes.

L'hygristor au carbone de la radiosonde VIZ MKII est un capteur de plus petite taille que le modèle utilisé dans la radiosonde VIZ 1392. Les deux capteurs se servent d'algorithmes d'étalonnage différents, fournis par le fabricant.

Les résultats présentés dans le tableau 12.8 montrent la nécessité de revoir les courbes d'étalonnage types utilisées depuis de nombreuses années pour plusieurs capteurs usuels, en particulier dans des conditions

d'humidité faible et élevée (voir également Garand et al., 1992). De nombreux algorithmes servant à décrire les performances des capteurs pourraient être révisés (voir, par exemple, Wade, 1994), car le traitement automatisé des données autorise l'emploi d'algorithmes plus complexes pour représenter l'étalonnage. Pour remplacer son hygristor au carbone, la société Sippican met au point un capteur capacitif dont les performances ont été évaluées lors de la comparaison de radiosondes organisées par l'OMM à Maurice.

Après la comparaison de radiosonde organisée par l'OMM au Japon, la société Meisei a modifié son condensateur à film mince pour éliminer le biais négatif qui nuisait aux données dans des conditions de forte humidité et le nouveau capteur est entré en service en 1999.

À Maurice, il est probable que ce soit le capuchon de protection en aluminium qui ait causé un biais

négatif, compte tenu de sa forte conductivité thermique et du manque de ventilation qu'il pouvait entraîner autour du capteur. En avril 2006, la société Meisei l'a donc remplacé par un capuchon en plastique de faible conductivité thermique, afin d'empêcher la conduction de chaleur vers l'intérieur, et d'un diamètre interne plus grand, pour obtenir une meilleure ventilation du capteur.

L'exactitude de l'étalonnage dans des conditions d'humidité élevée est essentielle pour les utilisateurs qui désirent incorporer les informations fournies par les radiosondes dans les modèles de prévision numérique du temps, tandis que l'exactitude de l'étalonnage quand l'humidité relative est faible revêt une grande importance en climatologie et pour la recherche scientifique.

Afin d'obtenir des mesures opérationnelles de bonne qualité, les opérateurs doivent vérifier soigneusement les performances des capteurs d'humidité relative au cours de la préparation du lancement. Quand il s'agit de condensateurs à film mince, il importe d'éliminer toute contamination chimique avant utilisation, sauf évidemment si l'on estime que le capteur n'a pas pu être contaminé durant son entreposage depuis qu'il a été livré par le fabricant. Les opérateurs doivent aussi consigner les valeurs transmises lorsque les radiosondes traversent des nuages bas. Ces informations doivent être envoyées aux fournisseurs pour qu'ils prennent des mesures correctives si l'étalonnage est clairement déficient dans des conditions d'humidité élevée.

Les erreurs de radiosondage sont rarement constantes sur toute la plage des valeurs d'humidité relative. Le calage du capteur Vaisala s'effectue au cours d'une vérification au sol à très faible humidité, avant le lancement. Ainsi, les mesures fournies par ce capteur sont plus reproductibles, d'un vol à l'autre, lorsque l'humidité relative est faible. Les procédures d'étalonnage des hygristors au carbone permettent d'obtenir une exactitude optimale à des valeurs proches de 30 % d'humidité relative. Les erreurs de radiosondage présentées par les hygristors au carbone VIZ sont souvent plus importantes quand l'humidité relative est très faible, que quand elle est moyenne ou élevée. Les capteurs à peau de batteur d'or produisent des erreurs de radiosondage plus prononcées que les autres capteurs, en partie en raison de leur temps de réponse relativement long et des erreurs d'hystérésis, dont il sera question dans la section suivante.

12.8.4.2 Problèmes de temps de réponse et d'hystérésis

On peut constater, d'après le tableau 12.4, que le temps de réponse de presque tous les appareils de

mesure de l'humidité n'est pas optimal, à faible température, dans la haute troposphère. Toujours dans la troposphère, mais dans des conditions de température relativement élevée, le temps de réponse des capteurs, comme les modèles à peau de batteur d'or et à chlorure de lithium, est trop long pour éviter les biais systématiques dans les couches sèches ou humides. Toutefois, les erreurs systématiques importantes dans les mesures effectuées par les condensateurs à film mince et les hygristors au carbone n'apparaissent qu'à partir de températures inférieures à -20 °C environ. Pour les hygristors au carbone, le temps de réponse devient extrêmement long sous -40 °C.

Les condensateurs à film mince peuvent fournir des mesures qui demeurent utiles, jusqu'à des températures inférieures à -70 °C, même si la fiabilité de l'étalonnage se détériore quelque peu aux températures les plus basses. À titre d'exemple et comme cela a été montré au cours de la comparaison de radiosondes organisée par l'OMM au Brésil, quand l'humidité relative se situe entre 30 et 70 %, les capteurs à condensateur à film mince des radiosondes Vaisala RS92 donnent, à -60 °C, des valeurs supérieures de 14 % à celles fournies par les condensateurs à film mince (Humicap A) également de la marque Vaisala. Ces mêmes capteurs produisent des mesures similaires, à quelques points de pourcentage près, à des températures plus élevées (voir tableau 12.8). L'écart type des différences entre les résultats donnés par les deux types de capteurs à -60 °C, pour cet intervalle de valeurs de l'humidité relative, correspond à environ 4 %. Miloshevich et al. (2001) et Leiterer et al. (2005) proposent des corrections pour compenser l'erreur d'étalonnage de l'Humicap A.

Compte tenu du fait que l'humidité relative peut osciller entre des valeurs faibles et très élevées plusieurs fois au cours d'une montée, l'hystérésis constitue un problème plus grave que dans le cas des capteurs de pression ou de température. Les erreurs d'hystérésis sont souvent limitées à quelques points de pourcentage d'humidité relative, mais elles peuvent être plus marquées avec un appareil comme le capteur à peau de batteur d'or. Un bon rodage en cours de fabrication ne peut corriger qu'en partie les erreurs d'hystérésis.

12.8.4.3 Écarts entre la température mesurée par les capteurs et la température atmosphérique vraie

Le point de rosée indiqué dans le message TEMP de radiosonde est dérivé de la tension de vapeur d'eau à un instant donné du vol. Cette tension de vapeur d'eau est généralement obtenue en multipliant la tension de vapeur saturante, calculée à partir de la température fournie par la radiosonde, par la valeur de l'humidité relative fournie par la radiosonde. Si

la température du capteur d'humidité relative ne correspond pas à celle signalée par la radiosonde, la valeur du point de rosée transmise est erronée. Cela peut se produire le jour ou la nuit, lorsque le décalage thermique du capteur d'humidité relative est beaucoup plus grand que celui du capteur de température. Si la température du capteur est décalée de 0,5 K par rapport à la température atmosphérique vraie, à une température avoisinant les 20 °C, l'humidité relative mesurée par le détecteur correspond à environ 97 % de la valeur vraie, soit une erreur de -1,5 %, à une humidité relative de 50 %. Quand la température chute à -10 °C puis à -30 °C, le même décalage produit des mesures équivalant à 96 et 95 % de la valeur vraie.

Pendant les vols diurnes, le rayonnement solaire direct peut également chauffer fortement le capteur d'humidité relative. En outre, capteur peut être chauffé indirectement par l'air qui est passé sur les plaques de protection ou sur les parois des tubes exposés au rayonnement solaire. Brousaides et Morrissey (1974) ont quantifié les erreurs pouvant être produites par les radiosondes VIZ. Cole et Miller (1995) ont, quant à eux, étudié les erreurs qui peuvent survenir lorsqu'on lance des radiosondes Vaisala RS80 à partir d'abris mal ventilés, dans les régions tropicales.

Les écarts entre les mesures diurnes effectuées par les hygristors au carbone et les condensateurs à film mince, obtenus au cours de la comparaison internationale OMM de radiosondes, étaient très voisins des valeurs observées la nuit. Ainsi, alors que les deux types de capteurs sont certainement affectés par des erreurs négatives causées par le réchauffement direct ou indirect du capteur d'humidité relative par le soleil, les erreurs avaient la même amplitude dans les deux cas.

Les résultats obtenus lors d'une comparaison organisée récemment incluant l'exécution simultanée d'observations à distance (radiomètres hyperfréquence ou vapeur d'eau par GPS) ont confirmé l'existence d'écarts jour-nuit dans les mesures de l'humidité relative fournies par les radiosondes modernes (voir par exemple Turner et al. (2003) et OMM/TD-N° 1265). Il est également possible de déduire ce type d'écart à partir de comparaisons récentes avec l'hygromètre "Snow White", puisque cet hygromètre fournit des mesures relativement constantes entre le jour et la nuit à des températures supérieures à -50°C. Dans les régions tropicales, l'écart jour-nuit dans les mesures de l'humidité relative exécutées par les radiosondes Vaisala RS80-A et RS90 à des niveaux élevés d'humidité peu après le lâcher s'élève à environ 5 % d'humidité relative (comparaison de radiosondes organisée par l'OMM au Brésil en 2002). Au cours de

la comparaison OMM de systèmes de radiosondage haut de gamme organisée à Maurice (OMM/TD-N° 1265), le revêtement des surfaces entourant le capteur de la radiosonde Vaisala RS92 ayant été modifié pour réduire l'échauffement par le soleil, l'erreur engendrée par ce phénomène n'atteignait que 2 à 3 % près de la surface et environ 5 % à 6 km d'altitude. À 11 km et une température de -40 °C, l'écart jour-nuit entre le capteur de Vaisala et l'hygromètre Snow White s'élevait à environ 9 %.

12.8.4.4 **Effet de l'eau et de la glace dans les nuages**

Quand on compare les performances d'anciens capteurs d'humidité relative après la traversée de nuages bas ou de brouillard (conditions dans lesquelles les capteurs de température externes deviennent humides), les écarts systématiques entre les mesures s'éloignent des valeurs indiquées dans le tableau 12.8. En particulier, les différences entre les mesures du condensateur à film mince de Vaisala et de l'hygristor au carbone de VIZ, pour une humidité relative de 0 à 70 %, majorent les résultats d'au moins 10 % en moyenne (Nash, Elms et Oakley, 1995). Ces deux types d'appareils peuvent produire d'autres erreurs, mais suivant des mécanismes très différents.

Les condensateurs à film mince de Vaisala, de même que les plaques de protection des capteurs, sont plus ou moins contaminés en traversant des nuages bas. À la sortie d'un nuage marqué par des conditions extrêmes de givrage, les capteurs peuvent indiquer des valeurs d'humidité relative atteignant jusqu'à 30 % de plus que les valeurs réelles. Les erreurs positives attribuables à la contamination se situent habituellement dans une fourchette de 1 à 20 %. La contamination peut, dans certains cas, ne durer que quelques minutes, mais elle peut aussi continuer d'influer sur les mesures jusque dans la haute stratosphère. En chauffant les capteurs au cours de l'ascension, on parvient à éliminer la contamination plus rapidement, ce qui est le cas de la radiosonde RS92 de Vaisala. Suivant les versions de cette radiosonde, cependant, on observe que celles équipées d'une fonction de chauffage active jusqu'à une température de -40 °C sont contaminées dans les nuages élevés, tandis que celles équipées de cette fonction jusqu'à -60 °C le sont nettement moins. Aux températures inférieures à -70 °C, la tension de vapeur saturante par rapport à l'eau est très faible et il convient de poursuivre les travaux pour déterminer si la décontamination des capteurs à de tels paliers de température est nécessaire pour obtenir des mesures fiables.

L'étalonnage des hygristors au carbone de VIZ n'est pas très stable lorsque les appareils sont exposés longtemps à une humidité relative élevée en labo-

ratoire. Si les capteurs se mouillent pendant une ascension ou s'ils sont exposés à des conditions très humides, l'étalonnage est souvent modifié au sortir du nuage. Cela fait chuter les mesures de 1 à 15 % en moyenne pendant le reste du vol, par rapport aux mesures réalisées dans des conditions sèches.

En conclusion, il faut considérer avec prudence les mesures effectuées dans la haute troposphère lorsque la radiosonde a traversé des couches nuageuses au niveau de la basse troposphère.

12.8.5 Erreurs de logiciel

Un grand nombre d'erreurs ou d'omissions dues au logiciel peuvent survenir dans un système terrestre de radiosondage. Il y a lieu de procéder à toute une série d'essais avant de modifier un logiciel ou d'en mettre en service un nouveau⁴.

Les opérateurs de station doivent surveiller tous les indices d'anomalies. Certaines erreurs ne se produisent que dans des conditions météorologiques particulières. Il peut donc être nécessaire de rassembler les données de nombreux vols afin de déterminer avec exactitude la nature de ces erreurs ou omissions. On doit mettre à la disposition des opérateurs des affichages interactifs complets ainsi que toutes les archives des informations transmises par les radiosondes pour qu'ils puissent détecter efficacement les anomalies.

12.9 COMPARAISON, ÉTALONNAGE ET MAINTENANCE

12.9.1 Comparaisons

Des centres de prévision contrôlent la qualité globale des mesures de l'altitude géopotentielle par radiosonde (et donc des mesures de la température dont la moyenne est établie pour des couches épaisses) en les comparant aux prévisions à court terme (six heures) de l'altitude géopotentielle des niveaux de pression standard, fournies par les modèles mondiaux de prévision numérique du temps pour le même emplacement. Les données statistiques ainsi établies sont regroupées en moyennes mensuelles qui servent à repérer les mesures de qualité insuffisante ainsi que les modifications systématiques importantes du rendement des radiosondes. C'est le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, établi à Reading, au Royaume-Uni, qui est principalement

chargé de cette tâche par la Commission des systèmes de base, mais d'autres centres de prévision nationaux produisent également ce type de statistiques.

On peut également déceler, dans chaque station, les erreurs aléatoires que comportent les mesures de l'altitude géopotentielle (et donc de la température) en analysant les variations dans les séries chronologiques de mesures de l'altitude géopotentielle, à des pressions inférieures ou égales à 100 hPa, dans des conditions de faible variabilité atmosphérique d'une journée à l'autre. Dans la publication OMM/TD-N° 344, on examine la concordance entre les résultats obtenus à l'aide de cette méthode et ceux provenant de la comparaison avec les champs de prévision à court terme.

Il est possible d'étudier en laboratoire les performances des radiosondes et de leurs capteurs en simulant les conditions de température et de pression des vols dans des caissons d'essai convenablement équipées.

La meilleure méthode d'analyse poussée des performances des capteurs de température, de pression et d'humidité relative en vol est l'essai de comparaison de radiosondes, au cours duquel plusieurs types de radiosondes sont emportées par le même ballon. L'annexe 12.C fournit des directives sur les comparaisons de radiosondes et l'établissement d'emplacements d'essai. Dans le cas d'une nouvelle radiosonde, il est préférable d'effectuer les comparaisons avec au moins deux autres modèles, les caractéristiques des erreurs associées à ces autres radiosondes devant avoir été établies au cours d'essais préalables. Un test de comparaison idéal devrait comprendre une méthode indépendante de mesure de l'altitude des radiosondes pendant le vol. On peut utiliser à cet effet un radar haute précision (ou un récepteur et processeur GPS fixé à la radiosonde et capable de mesurer avec exactitude l'altitude). Des mesures de qualité de l'altitude permettent d'évaluer avec fiabilité les erreurs systématiques que comportent les mesures de pression. C'est un avantage car les erreurs systématiques produites par de nombreux capteurs de pression courants varient, dans une certaine mesure, selon les conditions de vol et selon l'âge du capteur.

12.9.1.1 Évaluation de la qualité au moyen de prévisions à court terme

Avec les meilleurs modèles mondiaux de prévision numérique du temps, les erreurs aléatoires que comportent les prévisions à court terme (six heures) de l'altitude géopotentielle à 100 hPa se situent entre 10 et 20 m dans la plupart des régions du monde. Cela correspond à une erreur de température moyenne, pour une couche se situant entre la surface et 100 hPa, qui oscille entre 0,15 et 0,3 K. Ainsi, la comparaison avec les champs de prévision

⁴ Recommandation 4 (CIMO-XII) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa douzième session (1998).

permet de détecter les erreurs de sondage de température qui dépassent à peu près 0,3 K. Dans ce type de comparaison, on utilise les champs de prévision comme référence, plutôt que les champs d'analyse, car ils sont moins influencés par les erreurs systématiques que comportent les mesures de l'altitude géopotentielle obtenues par radiosondage dans la région. Les champs de prévision à échéance de six heures produisent néanmoins de faibles erreurs systématiques et ne doivent donc pas être considérés comme une référence absolue. L'incertitude entachant ces erreurs systématiques est d'au moins 10 m à 100 hPa. Les différences systématiques entre les prévisions et les mesures d'une station de radiosondage donnée varient, d'un centre de prévision à l'autre, d'au moins cette amplitude. En outre, les erreurs systématiques des champs de prévision peuvent aussi fluctuer d'autant lorsqu'on améliore les modèles de prévision et les techniques d'assimilation des données. Les comparaisons avec les champs de prévision effectuées dans les principaux centres fournissent toutefois des indications précises sur les stations et les types de radiosondes qui produisent de grandes erreurs systématiques dans les messages. La publication OMM/TD-N° 1197 renferme l'étude la plus récente sur les erreurs de radiosondage dans le réseau mondial jusqu'à 30 hPa.

12.9.1.2 Évaluation de la qualité à l'aide de séries chronologiques de données atmosphériques

On peut évaluer les erreurs aléatoires que comportent les radiosondages à partir de séries chronologiques de mesures rapprochées de l'altitude géopotentielle, à des niveaux de pression auxquels l'altitude géopotentielle varie lentement en fonction du temps, soit 100, 50 ou 30 hPa. Pour les observations de radiosondage effectuées toutes les douze heures, on calcule l'écart entre l'observation réalisée à +12 h et une interpolation linéaire dans le temps entre les observations réalisées à 0 et à +24 h. On poursuit ensuite les calculs de 24 heures en 24 heures dans la série chronologique. Une évaluation des erreurs aléatoires que comportent les radiosondages peut ensuite être déduite de l'écart type de ces différences. Sur la plus grande partie de l'année, cette procédure est aussi sensible que les comparaisons avec les champs de prévision. Toutefois, en hiver, aux latitudes moyennes et élevées, il peut arriver que l'altitude géopotentielle à 100 hPa fluctue très rapidement en un court laps de temps.

Les valeurs moyennes des écarts obtenus grâce aux séries chronologiques peuvent donner des renseignements sur les écarts jour-nuit dans les mesures de la température. Lorsque l'on veut interpréter les différences jour-nuit, il faut prendre en compte les variations quotidiennes réelles de l'altitude géopotentielle causées par les marées atmosphériques

diurnes et semi-diurnes. Les écarts jour-nuit réels aux latitudes moyennes, aux altitudes géopotentielles correspondant à 100 hPa, peuvent atteindre 30 m entre les observations réalisées à 1800 et 0600 (heure locale) (Nash, 1984), tandis qu'ils se situent généralement entre -10 m et + 10 m entre 1200 et 0000 (heure locale).

Il est recommandé aux stations de radiosondage de consigner les fluctuations dans les séries chronologiques de mesures de l'altitude géopotentielle à 100 hPa et dans la fourchette 100-30 hPa, pour faciliter la détection des grandes erreurs de mesure pendant l'ascension.

12.9.1.3 Essais comparatifs de radiosondes

Les essais comparatifs de radiosondes permettent de comparer de manière indépendante les performances des capteurs de pression, de température et d'humidité relative dans le temps.

Les essais en laboratoire sont à réaliser dans des installations semblables à celles utilisées par le fabricant pour étalonner avec exactitude les radiosondes. Ces essais peuvent servir à vérifier le caractère adéquat des étalonnages, notamment leur dépendance vis-à-vis de la température des capteurs. Il est toutefois difficile de simuler en laboratoire les conditions atmosphériques réelles qui conduisent aux erreurs radiatives et à l'humectation ou au givrage des capteurs. Pour ces erreurs, il est souhaitable d'effectuer des comparaisons pendant les montées réelles.

La comparaison des mesures exécutées durant un vol nécessite de synchroniser très précisément l'échantillonnage des différents systèmes, idéalement à moins d'une seconde près. On a mis au point ces dernières années des progiciels destinés aux essais réalisés à l'occasion de comparaisons OMM de radiosondes (OMM/TD-N° 771) qui stockent dans une base de données tous les échantillons de données des différentes radiosondes, afin que les scientifiques en charge puissent les comparer immédiatement après un vol d'essai. Il importe d'examiner très rapidement les échantillons au cours d'un test, car cela permet de déterminer sans tarder les problèmes causés par les procédures d'essai (les interférences entre radiosondes par exemple) ou les défauts des radiosondes et d'entreprendre une analyse plus poussée. Grâce au logiciel, on peut également présenter les résultats statistiques d'une comparaison sous une forme propre à la publication.

Les essais préalables des nouveaux modèles de radiosondes ne nécessitent qu'un petit nombre de vols de comparaison, ce qui suffit pour déceler les principales défauts. Une fois que la mise au point des systèmes est plus aboutie, des analyses plus poussées

peuvent se justifier. La reproductibilité des mesures effectuées par la plupart des radiosondes modernes s'est améliorée de telle façon qu'on peut maintenant obtenir des évaluations utiles des biais systématiques touchant la température et la pression en réalisant 10 à 15 vols dans une condition donnée (par exemple, un moment de la journée). Comme il est risqué de présumer que les vols diurnes à toutes les hauteurs solaires produisent la même erreur, il est préférable d'organiser au moins 10 à 15 vols de comparaison pour une même hauteur. Dans le cas de la mesure des performances de capteurs de température, les comparaisons avec les résultats d'autres essais devraient être réalisées la nuit. Ces comparaisons devraient se faire avec des capteurs aluminés ou à fil et non avec des détecteurs présentant des erreurs significatives dues à l'échange thermique infrarouge. Si l'on peut procéder à une série continue de vols de comparaison (en alternant les jours et les nuits), il est alors possible d'avoir recours à la technique des séries chronologiques de données atmosphériques afin d'évaluer l'amplitude des écarts jour-nuit dans les mesures de la température.

Comme cela est souligné plus haut, la série la plus complète d'essais comparatifs réalisée dans les dernières années a été la comparaison internationale OMM de radiosondes. Les premiers résultats ont été publiés dans les documents techniques de l'OMM N° 195, 451, 742, 1153 et 1265. Les informations présentées dans les tableaux 12.5 à 12.8 reposent sur ces résultats.

La première comparaison internationale de radiosondes a eu lieu à Payerne, Suisse, en 1950. Les écarts systématiques moyens entre les pressions et les températures étaient de 4 hPa et 0,7 K, avec des erreurs aléatoires (deux écarts-types) de 14 hPa et 2 K. Il y a lieu de rapprocher ces résultats de ceux fournis par les systèmes modernes (tableaux 12.5 à 12.7). Les chiffres obtenus lors de la deuxième comparaison menée au même endroit en 1956 ont montré qu'il fallait corriger les lectures de température pour tenir compte du rayonnement. Les erreurs touchant les mesures de la pression et de la température à 50 hPa étaient très importantes avec la plupart des radiosondes et augmentaient rapidement aux niveaux plus élevés, en particulier lors des vols de jour. En 1973 a été organisée une comparaison régionale à Trappes, en France, qui a permis de déceler des erreurs d'étalonnage significatives dans un certain nombre de radiosondes; sous l'effet du rayonnement, un capteur de température bimétallique a, par exemple, présenté une erreur de plus de 10 K.

12.9.2 Étalonnage

Il est important de connaître les méthodes d'étalonnage employées par les fabricants avant d'acheter

des radiosondes en grande quantité. Il faut également vérifier les procédures de contrôle de la qualité utilisées pour s'assurer que l'exactitude des mesures sera maintenue dans toute la production. L'acheteur doit se rappeler qu'il est nécessaire de tolérer un certain degré d'erreur et de panne pour que les coûts demeurent acceptables. Les taux de défaillance en vol de radiosondes provenant de fabricants fiables ne doivent toutefois pas être supérieurs à 1 ou 2 %.

L'étalonnage de chaque instrument se révèle nécessaire, sauf quand il est possible de produire en masse les instruments offrant la reproductibilité et l'exactitude désirées par l'utilisateur. Même lorsque la production en série satisfait un ensemble de contrôles de performance normalisés, il y a lieu d'examiner plus en détail des échantillons représentatifs choisis au hasard. L'étalonnage doit, dans la mesure du possible, simuler les conditions de pression et de température réelles, en abaissant progressivement ces valeurs. L'humidité relative est souvent vérifiée dans une installation distincte. Les capteurs de référence utilisés doivent pouvoir être reliés à des étalons nationaux, être vérifiés régulièrement dans des laboratoires d'étalonnage et fonctionner correctement à toutes les températures auxquelles sont exposées les radiosondes.

L'appareil d'étalonnage est différent selon que la radiosonde est étalonnée comme un tout ou en séparant les dispositifs météorologiques de l'émetteur. Dans ce dernier cas, on peut avoir recours à un appareil de plus petite taille. L'installation d'étalonnage doit être en mesure de simuler la gamme de pressions et de températures susceptible d'être rencontrée dans les conditions réelles. Il doit être possible de maintenir les conditions dans le caisson d'étalonnage à l'intérieur des valeurs suivantes: $\pm 0,2 \text{ hPa min}^{-1}$ pour la pression, $\pm 0,25 \text{ K min}^{-1}$ pour la température et $\pm 1 \% \text{ min}^{-1}$ pour l'humidité relative. Ces conditions doivent être mesurées avec des erreurs systématiques inférieures à $\pm 0,2 \text{ hPa}$, $\pm 0,1 \text{ K}$ et $\pm 1 \%$ respectivement. Il faut placer les thermomètres de référence dans le caisson d'étalonnage de manière à connaître la gamme de températures dans l'espace occupé par les capteurs. L'écart ne doit pas excéder 0,5 K. Il importe d'effectuer le nombre voulu de mesures pour que les courbes d'étalonnage représentent les performances des capteurs avec l'exactitude exigée par les utilisateurs. Les capteurs de pression qui ne sont pas entièrement compensés pour les variations de température doivent être étalonnés à plusieurs températures. Il serait donc utile que le caisson d'étalonnage des températures convienne également à l'évaluation des appareils de mesure de la pression.

L'étalonnage de l'humidité s'effectue ordinairement dans une installation distincte. Il peut s'agir d'un

caisson dans lequel un ventilateur fait circuler rapidement de l'air sur un psychromètre ou un hygromètre à condensation, puis à travers l'un des quatre récipients renfermant respectivement de l'eau chaude, une solution saturée de nitrate de sodium, une solution saturée de chlorure de calcium et du gel de silice. N'importe lequel de ces récipients peut être placé dans le circuit d'air à l'aide d'une vanne multiple, ce qui permet d'obtenir rapidement une humidité relative de 100, 70, 40 ou 10 %. L'écart type de la variation de l'humidité relative ne doit pas dépasser 1 % dans l'espace occupé par les appareils en cours d'étalonnage.

L'installation d'étalonnage de l'humidité peut être également composée d'un conduit ou d'un caisson ventilé à l'aide d'un mélange d'air provenant de deux récipients, le premier renfermant de l'air saturé d'eau, le deuxième de l'air asséché par du gel de silice. On contrôle manuellement le mélange à l'aide d'une vanne qui laisse passer les quantités d'air voulues dans le conduit.

Vu l'importance de l'étalonnage des radiosondes, que ce soit individuellement ou par lot, la Commission des instruments et des méthodes d'observation⁵ prie instamment ses Membres de soumettre, à l'échelon national ou régional, divers échantillons de radiosondes à des essais en laboratoire destinés à vérifier que les étalonnages fournis par le fabricant sont valables.

12.9.3 Maintenance

Les taux de défaillance de l'équipement terrestre des systèmes de radiosondage qui ont recours à l'électronique moderne doivent demeurer faibles, à condition que la proximité des antennes soit bien protégée de la foudre. Le fabricant doit être en mesure de conseiller une sélection d'éléments de rechange correspondant au type d'équipement. Lorsqu'un module de l'équipement terrestre tombe en panne, il convient de pouvoir le remplacer par un bloc de rechange et de le retourner pour le faire réparer.

Les exigences relatives à la maintenance des systèmes dans lesquels les mesures de la pression sont remplacées par les mesures de l'altitude par radar sont très différentes. La maintenance doit être assurée localement dans tout le réseau par un personnel possédant la compétence technique nécessaire (en mécanique et en électricité). C'est essentiel pour conserver une bonne capacité de suivi et pour éviter la dérive à long terme des erreurs systématiques dans les mesures d'altitude.

⁵ Recommandation 9 (CIMO-XI) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa onzième session (1994).

12.10 CALCUL ET TRANSMISSION DES OBSERVATIONS

Il n'existe pas de procédures normalisées pour le calcul des observations de radiosondage. La difficulté consiste à bien choisir les niveaux qui permettront de reproduire précisément et efficacement les profils de température et d'humidité en fonction du géopotentiel, à partir des données de radiosondage. On peut obtenir des renseignements utiles dans la publication OMM/TD-N° 175 et dans les procédures de codage approuvées par l'OMM (OMM-N° 306) (Code FM 35-X Ext. TEMP).

12.10.1 Calcul des données de radiosondage et procédures de transmission des observations

Les mesures en altitude sont habituellement incorporées dans les prévisions numériques du temps sous la forme d'une série de moyennes par couche, l'épaisseur des couches étant liée aux échelles du mouvement atmosphérique qui correspondent au type de prévision. Ces couches ne sont pas nécessairement centrées sur des pressions ou altitudes standard, mais plutôt sur des niveaux qui varient en fonction des fluctuations de la pression de surface. Ainsi, faut-il transmettre avec suffisamment d'exactitude les variations de la température et de l'humidité relative entre les niveaux standard figurant dans les messages d'observation en altitude pour que la qualité des moyennes par couche qui servent à la prévision numérique n'en pâtit pas.

Avant 1980, la plupart des mesures de radiosonde étaient traitées manuellement par les opérateurs, qui utilisaient diverses aides de calcul. Les méthodes employées reposaient sur la sélection d'un nombre limité de niveaux significatifs pour représenter les mesures, soit une trentaine dans le cas d'un vol atteignant jusqu'à 30 km d'altitude. Les codes de l'OMM témoignaient de la difficulté de condenser manuellement une grande quantité d'informations sur la structure verticale de l'atmosphère dans un court message. Les règles de codage permettaient de procéder à des interpolations linéaires en altitude entre les niveaux significatifs, avec des écarts maximaux par rapport aux mesures d'origine de ± 1 K pour la température et de ± 15 % pour l'humidité relative, dans la troposphère, et de ± 2 K pour la température, dans la stratosphère. Les opérateurs étaient censés supprimer les grandes erreurs d'interpolation sur des couches épaisses dans le plan vertical.

Les systèmes terrestres modernes comportant des ordinateurs puissants, mais peu coûteux permettent un taux d'échantillonnage plus élevé pour archiver et traiter les mesures de radiosonde. Le traitement

manuel de ces mesures introduit presque toujours des erreurs indésirables dans les calculs des données en altitude, aussi doit-il être éliminé le plus rapidement possible.

Dans le cas des messages TEMP, l'automatisation de la procédure de sélection concernant les niveaux significatifs n'est toutefois pas directe. Les algorithmes permettant d'établir automatiquement les messages d'observation en altitude comportent souvent d'importants défauts. Par exemple, lorsque surviennent quelques variations prononcées de l'humidité relative dans le plan vertical, les systèmes automatisés autorisent de grandes erreurs d'interpolation de la température sur plusieurs kilomètres. Il se produit également souvent des erreurs systématiques déterminantes entre la structure de l'humidité relative communiquée et les mesures d'origine, sur des épaisseurs allant jusqu'à 500 m. C'est inacceptable pour les utilisateurs, en particulier dans la couche limite atmosphérique et lorsque la radiosonde traverse des nuages. L'interpolation entre les principaux niveaux de nuages doit avoisiner l'humidité relative maximale observée dans le nuage.

Les opérateurs doivent donc vérifier les messages produits par les systèmes automatisés afin de voir si les procédures de codage introduisent des erreurs systématiques importantes entre le message d'observation en altitude et les mesures effectuées au départ par les radiosondes. Il est possible qu'il leur faille ajouter des niveaux significatifs dans le but d'éliminer les biais indésirables. Il est généralement plus facile d'obtenir des messages TEMP présentant des erreurs systématiques acceptables en adoptant une norme nationale correspondant à la moitié des limites d'ajustement des températures établies par l'OMM, dont il a été question plus haut. L'amélioration des communications météorologiques devrait par ailleurs réduire les approximations dans la transmission des observations en altitude par l'emploi de messages codés BUFR.

12.10.2 Corrections

On comprendra aisément, après avoir lu ce qui précède, que les variations de performances des capteurs causées par la diversité des conditions auxquelles sont exposées les radiosondes pendant une montée sont trop importantes pour être représentées par un simple étalonnage obtenu à une température donnée. Les techniques modernes de traitement de données ont conduit à l'utilisation d'algorithmes d'étalonnage plus complexes qui fournissent des mesures plus exactes que les systèmes manuels. Il est essentiel que ces algorithmes soient bien décrits. Les utilisateurs doivent être tenus informés des améliorations ou modifications

déterminantes qui leur sont apportées. Il appartient aux stations de radiosondage de bien archiver les numéros des modèles de radiosondes utilisées et les références des algorithmes employés pour traiter les données.

Toutes les mesures de la température réalisées par les radiosondes comportent des erreurs dues au rayonnement. Dans la plupart des cas, ces erreurs ne peuvent être parfaitement corrigées car elles dépendent de la distribution des nuages, de l'état de la surface, de l'orientation de la radiosonde pendant l'ascension et de la hauteur du soleil. Les utilisateurs qui n'appartiennent pas aux Services météorologiques ne connaissent généralement pas les caractéristiques des erreurs propres aux capteurs employés à l'échelle nationale. Il est par conséquent recommandé de toujours appliquer une correction pour le rayonnement (fondée sur les performances prévues des capteurs dans les conditions habituelles) au cours du traitement des données. Les renseignements détaillés concernant cette correction devraient être consignés et conservés dans les archives de la station, avec les observations brutes des radiosondes, selon les procédures nationales en vigueur.

Les erreurs attribuables à l'échange thermique infrarouge posent un problème particulier de correction, car elles ne sont pas indépendantes de la température atmosphérique. Les erreurs causées par le réchauffement par le rayonnement solaire sont semblables pour les capteurs métalliques (aluminés, par exemple) et les capteurs peints en blanc (voir tableau 12.7). Il est donc préférable de cesser d'utiliser le plus rapidement possible de la peinture blanche à émissivité élevée dans l'infrarouge comme revêtement, plutôt que de faire appel à des systèmes de correction très complexes.

De même, au lieu de tenter de compenser à l'aide d'un logiciel les erreurs de réchauffement par rayonnement solaire anormalement importantes, il faut éliminer les sources additionnelles de chaleur en plaçant correctement le capteur par rapport à ses supports, aux branchements et au corps de la radiosonde.

Vu la diversité des méthodes de correction appliquées, la Commission des instruments et des méthodes d'observation⁶ prie instamment ses Membres :

- a) De corriger les données en altitude provenant des diverses stations aérologiques du Système mondial d'observation et d'en transmettre la version corrigée ;

⁶ Recommandation 8 (CIMO-XI) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa onzième session (1994).

- b) D'indiquer aux utilisateurs de données les modifications intervenant dans les méthodes employées pour corriger les messages, de façon que leurs destinataires puissent procéder aux ajustements qui leur paraîtraient souhaitables ;
- c) D'archiver les observations en altitude, corri-
gées ou non corrigées, et d'établir un état des corrections appliquées aux fins des travaux climatologiques; la méthode utilisée devrait être déterminée à l'échelon national ;
- d) D'informer l'OMM de la méthode de correction appliquée.

ANNEXE 12.A

**EXIGENCES RELATIVES A L'EXACTITUDE (ERREUR TYPE)
DES MESURES EN ALTITUDE DESTINÉES À LA MÉTÉOROLOGIE
SYNOPTIQUE, INTERPRÉTÉES POUR LES MESURES CONVENTIONNELLES
EN ALTITUDE ET DU VENT**

<i>Variable</i>	<i>Zone couverte</i>	<i>Exactitude exigée</i>
Pression	De la surface à 100 hPa	Entre 1 et 2 hPa, à environ 100 hPa
	De 100 à 10 hPa	2 %
Température	De la surface à 100 hPa	0,5 K
	De 100 à 10 hPa	1 K
Humidité relative	Troposphère	5 % (HR)
Direction du vent	De la surface à 100 hPa	5°, pour moins de 15 m s ⁻¹ 2,5°, pour des vitesses plus élevées
	De 100 à 10 hPa	5°
Vitesse du vent	De la surface à 100 hPa	1 m s ⁻¹
	De 100 à 10 hPa	2 m s ⁻¹
Altitude géopotentielle du niveau significatif	De la surface à 100 hPa	1 % près de la surface, jusqu'à 0,5 % à 100 hPa

ANNEXE 12.B

**SEUILS DE PERFORMANCE CONCERNANT LE VENT EN ALTITUDE
ET LA TEMPÉRATURE, L'HUMIDITÉ RELATIVE ET L'ALTITUDE
GÉOPOTENTIELLE DÉTERMINÉES À L'AIDE D'UNE RADIOSONDE**

Tableau 1. Récapitulation des seuils de performance pour les appareils de mesure du vent

Pour l'étude des systèmes de moyenne échelle à tous les niveaux et tous les emplacements, un seuil inférieur (*a*) de 0,5 m s⁻¹ semble convenir.

Région	Niveau de pression (hPa)	Altitude (km)	Application locale		Application synoptique		Application climatologique		Force du vent à laquelle l'équipement de sondage doit pouvoir fonctionner	Remarques
			(<i>a</i>)	(<i>b</i>)	(<i>a</i>)	(<i>b</i>)	(<i>a</i>)	(<i>b</i>)		
Troposphère extratropicale			0,8 jusqu'à 1,5 près de la tropopause	6 10 ^a	1 2 près de la tropopause	4 7 ^b	1 2 près de la tropopause	5 ^c 10 ^c	40 ^d 80 ^d jusqu'à 37 ^d près de la tropopause	À certains endroits, il peut être nécessaire d'effectuer des mesures avec des vents de 50 m s ⁻¹ , dans la basse troposphère, et de 150 m s ⁻¹ , près de la tropopause.
Troposphère équatoriale			0,8 jusqu'à 1,5 ^e près de la tropopause	4 7 ^f	1 2 près de la tropopause	3 6 ^g	1 2 près de la tropopause	5 ^h 5 ^h	20 60 jusqu'à 40 près de la tropopause	Ne tient pas compte des sondage dans les cyclones tropicaux.
Stratosphère extratropicale	50 30	20 24	0,7 0,7	3 ⁱ 2	0,7 0,7	5 ^j 3,6	0,7 0,7	La variable fluctue en fonction de la saison, de l'altitude et de l'emplacement	75 ^k 100 ^k	Non spécifié
	10	31	1	3	1	5,5	1			
	5 0,7	36 50	1,2 (1,5)	3 4	1,2 (1,5)	7 13	1,2 (1,5)	et de l'emplacement	200	
Stratosphère équatoriale	50 30	20 24	0,7 0,7	5	0,7 0,7	5	0,7 0,7	5	40 ^l 45 ^l	Non spécifié
	10	31	1	5	1	5	1	5	100 ^l	
	5 0,7	36 50	10 1,5	10	1,2 1,5	10	1,2 1,5	10		

(a) Le seuil le moins strict (*b*) est de 30 m s⁻¹ (hiver, Atlantique Nord)

(b) Le seuil le moins strict (*b*) est de 20 m s⁻¹ (hiver, Atlantique Nord).

(c) Ces limites se rapportent aux seuils les moins stricts (*b*) de la partie systématique de l'erreur. Les valeurs correspondantes pour l'écart vectoriel type de la partie aléatoire de l'erreur sont 10 m s⁻¹ et jusqu'à 15 m s⁻¹ près de la tropopause. Des seuils plus stricts (*b*) conviennent dans de nombreuses zones où il existe déjà de grandes quantités de données de bonne qualité.

(d) Pour un vent moyen entre 0 et 40 000 pieds (0 et 12 km) en hiver; au sud de l'Angleterre, la limite (*a*) est de 60 m s⁻¹ et la limite (*b*) de 27 m s⁻¹; au sud du Japon, où les conditions sont les plus rigoureuses, la limite (*a*) est de 80 m s⁻¹ et la limite (*b*) de 50 m s⁻¹.

(e) Une augmentation faible ou inexistante en fonction de l'altitude peut être observée sur de grandes distances, avec un seuil (*a*) de 1 m s⁻¹ dans la haute troposphère.

(f) Le seuil le moins strict (*b*) est de 15 m s⁻¹ (surtout en hiver, près de la limite des tropiques).

(g) Le seuil le moins strict (*b*) est de 12 m s⁻¹ (surtout en hiver, près de la limite des tropiques).

(h) Ce sont les seuils les moins stricts (*b*) de la partie systématique de l'erreur. Les valeurs correspondantes pour l'écart vectoriel type de la partie aléatoire de l'erreur sont 5 m s⁻¹ et jusqu'à 10 m s⁻¹ dans la haute troposphère.

(i) Les seuils les moins stricts (*b*) en hiver sont de 11 et 13 m s⁻¹ respectivement à 50 et 30 hPa, de 20 et 25 m s⁻¹ à 10 et 5 hPa et sont encore plus élevés à 1 hPa. Ces valeurs seuils correspondent à des moyennes sur de courtes périodes (un mois); des valeurs encore plus

élevées s'appliquent à des moyennes sur de longues périodes (par exemple, plusieurs hivers), mais les distributions dans de tels échantillons risquent fort de provenir de plusieurs modèles.

(j) Les seuils les moins stricts (*b*) en hiver sont de 6, 7, 10, 12 et 16 m s⁻¹ respectivement à 50, 30, 10, 5 et 0,7 hPa.

(k) Pour un vent moyen entre 0 et 100 000 pieds (0 et 30 km) dans la pire saison (hiver) au sud de l'Angleterre, le seuil (*a*) est de 45 m s⁻¹ et le seuil (*b*) de 26 m s⁻¹.

(l) Ces vents maximaux observés à certains niveaux ne se produisent pas simultanément à tous les niveaux. Ce sont des évaluations des vents les plus forts susceptibles de survenir lorsque les oscillations annuelles et de «26 mois» se combinent pour donner les vents moyens les plus puissants. Les vents moyens dans des couches épaisses seront de beaucoup inférieurs à ces valeurs en raison des faibles corrélations entre niveaux.

• *Notes :*

Seuil (*a*) — Seuil d'erreur au-dessous duquel il n'est pas nécessaire d'apporter des améliorations pour l'application.

Seuil (*b*) — Seuil d'erreur au-dessus duquel les données obtenues sont peu utiles pour l'application.

(Les valeurs varient nettement en fonction de la saison et de l'emplacement; sauf indication contraire, ce sont des erreurs vectorielles types exprimées en m s⁻¹).

Sauf indication contraire, les valeurs s'appliquent à des mesures du vent moyen pour une couche de 300 à 400 m d'épaisseur, dans la troposphère, et de 600 à 800 m d'épaisseur, dans la stratosphère, centrée sur le niveau auquel les observations sont transmises.

Tableau 2. Récapitulation des seuils de performance pour les sondages de température aérologiques

Région	Niveau de pression (hPa)	Altitude (km)	Application locale		Application synoptique		Application climatologique		Gamme de températures	Remarques
			(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)		
Troposphère extratropicale		0,15	3,0 ^a (2,0 de 30° à 40° de latitude)	0,15	2,0	0,15	2,0 ^b		De -80 à +40	
Troposphère équatoriale	Basse troposphère	0,15	1,0	0,15	0,7	0,15	1,0 ^b	1,5 ^b	De -100 à +40	
	Haute troposphère	0,15	1,5	0,15	1,0	0,15				
Stratosphère extratropicale	200	0,3	4 ^c	0,3	3,8	0,3	1,5 ^f			
	100	0,3	3	0,3	1,4	0,3	1,5			
	50	0,3	1,5	0,3	0,7	0,3	1,5			
	10	0,3	1,5	0,3	0,7	0,3	1,5			
	5	0,3	2 ^d	0,3	0,9	0,3	2 ^c			
	(5)	35	0,3	4 ^d	0,3	0,3	4 ^c			
		50	0,3	6 ^e	0,3	2,0	0,3	6 ^d		
Stratosphère équatoriale	100	0,3	2 ^g	0,3	1	0,3	2 ^h		On a considéré que le cycle de température de 26 mois dans la moyenne stratosphère relevait de la climatologie plutôt que du changement climatique.	
	50	0,3	2	0,3	1	0,3	2			
	10	0,3	3	0,3	1,5	0,3	3			
		35	0,3	3,5	0,3	1,5	0,3	3,5		
		50	0,3	4,5	0,3	2	0,3	4,5		

(a) Le seuil supérieur (b) est de 7 °C (au-dessus des continents en hiver).

(b) Ces valeurs correspondent à la partie systématique de l'erreur.

(c) Toutes les valeurs figurant dans cette colonne peuvent nettement augmenter en hiver.

(d) Deux seuils (b) sont donnés pour le même niveau par différentes séries d'observations. Les deux valeurs peuvent être trop élevées en raison d'erreurs instrumentales lors des observations.

(e) Cette valeur pour 50 km est à rapprocher de celle indiquée pour 35 km. Encore une fois, la valeur donnée pourrait être trop importante. Il serait probablement réaliste de la situer entre 4 et 5 °C.

(f) Toutes les valeurs figurant dans cette colonne correspondent aux écarts types des erreurs aléatoires. Des erreurs légèrement plus importantes dans la basse stratosphère et beaucoup plus importantes dans la haute stratosphère fourniraient des informations utiles en hiver. Les valeurs du seuil (b) se rapportant à la partie systématique de l'erreur sont très variables (voir le paragraphe 5.4.6 de la Note technique N° 112 de l'OMM).

(g) Toutes les valeurs de cette colonne reposent sur la variabilité apparente de l'atmosphère. Cette variabilité comprend les erreurs d'observation attribuables aux instruments, erreurs qui sont aléatoires d'un sondage à l'autre et qui risquent fort d'être importantes avec les instruments utilisés pour obtenir les relevés dont il est question ici (voir le paragraphe 5.5.3 de la Note technique N° 112 de l'OMM).

(h) Toutes les valeurs figurant dans cette colonne correspondent aux écarts types des erreurs aléatoires. Pour les mesures de la température à des fins climatologiques, il convient de prendre pour hypothèse de base que l'erreur systématique est égale à 0.

• Notes :

Seuil (a) — Erreur type de température au-dessous de laquelle il n'est pas nécessaire d'apporter des améliorations pour l'application.

Seuil (b) — Seuil d'erreur au-dessus duquel les données obtenues sont peu utiles pour l'application.

(La plupart des valeurs varient nettement en fonction de l'emplacement et de la saison; sauf indication contraire, ce sont des erreurs types exprimées en °C.)

Sauf indication contraire, les valeurs s'appliquent à des mesures de la température moyenne pour une couche de 30 à 40 m d'épaisseur dans la stratosphère, centrée sur le niveau auquel les observations sont transmises.

Tableau 3. Récapitulation des seuils de performance pour les sondages d'humidité aérologiques

Couche	Application locale				Application synoptique				Application climatologique				Remarques	
	(a)		(b)		(a)		(b)		(a)		(b)			
	°C	HR %	°C	HR %	°C	HR %	°C	HR %	°C	HR %	°C	HR %		
Couche turbulente et de convection près du sol	0,5	3	5	30	0,5	3	5	30	0,5	3	1,5 ^a	10 ^a	Les erreurs systématiques lors d'un sondage doivent être inférieures à 0,15 °C (1% HR) dans la mesure du possible, de sorte qu'il soit possible de spécifier la teneur en eau moyenne d'une colonne d'air avec plus d'exactitude que la teneur en eau à un niveau précis.	
Troposphère au-dessus de la couche de convection	0,2 ^b	1 ^b	10	30	0,2 ^b	1 ^b	10	30	0,5	3	1,5 ^a	10 ^a	Exigence supplémentaire concernant la mesure des gradients d'humidité très prononcés destinée à la radiométéorologie	
	2,5 ^c	10 ^c	10	30	2,5 ^c	10 ^c	10	30	0,5	3	1,5 ^a	10 ^a	humidité faible	

(a) Ces valeurs correspondent à la partie systématique de l'erreur, partie constante d'un sondage à l'autre à un niveau donné.

(b) Il semble plus facile de déterminer directement la présence d'eau.

(c) Les erreurs systématiques lors d'un sondage ne doivent pas dépasser 1,5 °C (5 % HR).

Notes :

Seuil (a) — Seuil d'erreur du point de gelée blanche, du point de rosée ou de l'humidité relative au-dessous duquel il n'est pas nécessaire d'apporter des améliorations pour l'application.

Seuil (b) — Seuil d'erreur du point de gelée blanche, du point de rosée ou de l'humidité relative au-dessus duquel les données obtenues sont peu utiles pour l'application.

(Les valeurs indiquées pour l'humidité relative, qui ne sont pas des équivalences au sens strict, offrent la possibilité de mesurer les performances d'une façon différente.)

Tableau 4. Récapitulation des exigences de performance concernant la détermination de l'altitude des surfaces isobares et des points significatifs

Région	Niveau de pression (hPa)	Application locale		Application synoptique		Application climatologique	Remarques	
		(a)	(b)	(a)	(b)			
Moyennes et hautes latitudes	Basse troposphère	5	45 ^a	1,5 ^d	25 ^e	1,5 ^f	Pour les surfaces isobares dans la mésosphère, les seuils ne sont pas évalués en détail (voir § 7.3.5, Note technique. N° 112, OMM) Des erreurs aléatoires d'altitude ayant un écart type de 85 m à chaque station et à tous les niveaux sont à associer à des erreurs quadratiques moyennes de la composante vent de 10 m s ⁻¹ , à des latitudes moyennes, en supposant que les stations sont distantes de 1 000 km.	
		300	10	80 ^b	1,5	70		
		100	10	45 ^c	1,5	35		
		50	10	30 ^c	1,5	10		
		30	10	30 ^c	1,5	20		
		10		30 ^c	1,5	40		
		5		40 ^c	1,5	60		
		1		50 ^c	1,5	110		
Ceinture équatoriale	Basse troposphère	5	20	1,5	12 ⁱ	1,5 ^f	Altitude des niveaux significatifs	
		700	5	10	1,5	12		
		300	10	25	1,5	12		
		100	10	50 ^h	1,5	12		
		10		50 ^h	1,5	12		
		1		50 ^h	1,5	12		
Toutes les latitudes		Altitude des niveaux significatifs						
				15	600			

(a) La valeur inférieure (b) dans les basses latitudes (20°) en été est d'environ 15 m.

(b) La valeur supérieure (b) est de 240 m (hiver, Atlantique Nord). La valeur inférieure (b) est d'environ 25 m (basse latitude (20°) en été).

(c) Ces valeurs sont beaucoup plus importantes en hiver; de l'ordre de 100 m à 50 hPa, de 500 m à 5 hPa et de 650 m à 1 hPa.

(d) Les valeurs figurant dans cette colonne varient probablement en fonction de la latitude d'environ 1,5 m, dans les basses latitudes, à 3 m dans les hautes latitudes.

(e) Les valeurs de cette colonne sont des valeurs types pour une distance de 300 km entre les stations dans les latitudes moyennes, dans une direction normale par rapport au vent. Elles varient en fonction de la latitude, comme le montre le tableau XXVIII de la Note technique N° 112 de l'OMM. Les valeurs stratosphériques correspondent aux conditions estivales; elles augmentent considérablement en hiver, p. ex. jusqu'à 50 m à 50 hPa (voir § 7.3.5, Note technique N° 112 de l'OMM). Les seuils appropriés pour l'écart type des erreurs aléatoires aux stations individuelles sont les valeurs du tableau divisées par $\sqrt{2}$ lorsque les écarts types aux stations sont égaux.

(f) Les valeurs figurant dans cette colonne correspondent aux erreurs systématiques ou aux erreurs types des valeurs moyennes d'un grand nombre de sondages.

(g) Lorsque les échantillons sont assez importants, le seuil (b) est déterminé par d'autres facteurs que les erreurs d'observation de l'altitude géopotentielle dues aux instruments (voir § 7.3.6, Note technique N° 112 de l'OMM).

(h) Ces valeurs varient nettement selon les circonstances. Elles peuvent augmenter ou diminuer d'un facteur d'environ 3.

(i) Les erreurs aléatoires ayant un écart type de 25 m à tous les niveaux présentent un certain intérêt, mais elles dégradent l'espacement effectif dans le réseau.

(j) Les valeurs figurant dans cette colonne correspondent à l'erreur type des valeurs moyennes sur de courtes périodes (p. ex. mensuelles). Les valeurs correspondantes pour l'écart type des erreurs instrumentales, qui sont aléatoires d'un sondage à l'autre, sont de $20 \sqrt{n}$ m, où n est le nombre d'observations disponibles pour établir une moyenne.

• Notes :

Seuil (a) — Seuil d'erreur au-dessous duquel il n'est pas nécessaire d'apporter des améliorations pour l'application.

Seuil (b) — Seuil d'erreur au-dessus duquel les données obtenues sont peu utiles pour l'application.

(Sauf indication contraire, les valeurs sont les écarts types des erreurs aléatoires; l'unité employée est le mètre géopotentiel.)

ANNEXE 12.C

DIRECTIVES SUR LES COMPARAISONS DE RADIOSONDÉS ET L'ÉTABLISSEMENT D'EMPLACEMENTS D'ESSAI⁷

PARTIE I – DIRECTIVES SUR LES COMPARAISONS DE RADIOSONDÉS

1. Introduction

Les présentes directives supposent une cohérence entre les méthodes que peuvent établir différents emplacements d'essai et celles établies par d'autres organismes nationaux et internationaux. Elles sous-entendent aussi la constitution d'un comité d'organisation que composeront les participants (les Membres) ayant l'intention de procéder à une comparaison de radiosondes et au moins un non-participant compétent dans la conduite des comparaisons. Il importe d'inclure dans ce comité un non-participant indépendant afin d'éviter toute partialité dans l'organisation de la comparaison. Il faut aussi examiner s'il y a lieu de faire participer activement à la comparaison le personnel de fabricants de radiosondes ou de demander à l'établissement d'accueil de prévoir le personnel d'exploitation indépendant qui sera chargé d'assurer la préparation et le lâcher des radiosondes.

Comme toutes les comparaisons diffèrent dans une certaine mesure les unes des autres, on considérera que les présentes directives constituent en fait une énumération générale des tâches à accomplir. Le comité d'organisation peut donc adapter celles-ci en fonction des besoins, étant entendu qu'il ne doit pas transiger sur la représentativité des résultats et leur évaluation scientifique.

Pour la marche à suivre à adopter concernant l'exécution des comparaisons, il est possible de s'inspirer des rapports de comparaisons précédentes de l'OMM et des rapports de réunions des comités d'organisation. Ces rapports peuvent être obtenus auprès du Secrétariat de l'OMM qui a pour charge de les conserver.

2. Objectifs de la comparaison

Les objectifs de la comparaison doivent être clairs. Il y a lieu d'établir une liste de ce que l'on attend de la comparaison et de déterminer comment les résultats seront diffusés. Le comité d'organisation est chargé

d'examiner les objectifs à atteindre au cours de la comparaison de radiosondes et de déceler, pour les anticiper, les problèmes qui risquent de se poser. Il est chargé de rédiger un exposé clair et détaillé des principaux objectifs de la comparaison et d'arrêter les critères sur lesquels on se fondera pour évaluer les résultats. Il doit également étudier quelle est la meilleure façon de garantir le succès de la comparaison, en tirant parti des connaissances générales en la matière et de l'expérience acquise lors de comparaisons précédentes.

3. Lieu, date et durée de la comparaison

L'établissement d'accueil fournit au comité d'organisation et aux participants une description du lieu proposé pour la comparaison et du dispositif prévu (emplacement(s), conditions environnementales et climatiques, caractéristiques topographiques, etc.). Il désigne en outre un directeur ou administrateur de projet à qui il confie la gestion quotidienne de la comparaison et les relations avec les participants.

Il incombe au comité d'organisation de vérifier, par une visite, si le lieu et le dispositif prévus conviennent et de proposer les modifications qu'il juge nécessaires. Une fois que le comité d'organisation a donné son agrément concernant le lieu et le dispositif, le directeur de projet rédige une description de ce lieu et de l'environnement correspondant, qui sera distribuée aux participants. Étant au fait de l'emploi du temps de l'établissement d'accueil, le directeur de projet fixe la date du début et la durée de la comparaison. Il fournit un exemplaire du calendrier prévu au comité d'organisation.

Outre la date du début de la comparaison, le directeur de projet doit proposer une date à laquelle le lieu retenu et le dispositif prévu seront disponibles pour l'installation de l'équipement des participants et son branchement au système d'acquisition des données. Il y a lieu de prévoir une période suffisante, avant le début de la comparaison, pour que tous les participants puissent procéder à des vérifications et des essais sur leur équipement, et aussi pour que les opérateurs puissent se familiariser avec les méthodes en vigueur dans l'établissement d'accueil.

⁷ Annexe II du Rapport final abrégé, résolutions et recommandations de la douzième session de la Commission des instruments et des méthodes d'observation (OMM-N° 881).

4. Participation

Lorsqu'il y a lieu, le directeur de projet et/ou le comité d'organisation prient le Secrétaire général d'inviter les Membres à participer à la comparaison. Le directeur de projet s'occupe ensuite de tous les autres contacts avec les participants, une fois que ceux-ci sont connus.

Le directeur de projet établit un questionnaire détaillé, que le Secrétaire général envoie ensuite à tous les participants pour obtenir les renseignements requis sur chaque type d'instrument proposé pour la comparaison. Les participants sont ainsi invités à préciser, dans leurs réponses, leurs exigences en matière d'espace, de communication et de raccordement de leur matériel, ainsi que les caractéristiques de leurs logiciels. Il leur faut aussi fournir une documentation appropriée décrivant les équipements au sol et les instruments emportés par ballon.

Il importe que les participants fournissent les renseignements voulus sur les méthodes d'étalonnage de leurs radiosondes par rapport aux étalons reconnus. On s'attend à ce que les comparaisons portent essentiellement sur des radiosondes en service, mais ce ne sera pas toujours le cas. On peut aussi envisager la participation de nouveaux modèles de radiosondes ou de modèles expérimentaux. Il faudra alors obtenir l'accord de tous les autres participants, du directeur de projet et du comité d'organisation.

5. Responsabilités

5.1 Participants

Les participants assument la responsabilité du transport de leur propre équipement et les coûts correspondants.

Il appartient aux participants d'installer et de retirer leur propre équipement et de tenir le directeur de projet au courant de ces opérations. Au besoin, l'établissement d'accueil prête son concours aux participants pour les opérations de déballage et d'emballage.

Les participants fournissent tous les accessoires nécessaires, le matériel de montage de l'équipement au sol, les câbles et connecteurs d'alimentation et de communication, les pièces de rechange et le matériel consommable spécifique. Ils doivent posséder toutes les instructions détaillées et les manuels nécessaires sur l'installation, le fonctionnement, l'entretien et, éventuellement, l'étalonnage de leur équipement (pour pouvoir les mettre à la disposition de l'établissement d'accueil si celui-ci venait à devoir les aider).

5.2 Établissement d'accueil

Il incombe à l'établissement d'accueil d'aider au besoin les participants à déballer et à installer leur équipement et de tenir à leur disposition des installations destinées au stockage des pièces de rechange, des manuels, du matériel consommable, etc.

Il lui incombe de fournir au besoin l'équipement auxiliaire dont il dispose.

Il lui incombe d'aider au besoin les participants à connecter leur équipement au système d'acquisition des données.

Il appartient à l'établissement d'accueil de faire respecter toutes les obligations légales s'appliquant aux mesures en altitude (ex.: la réglementation aérienne en vigueur dans le pays hôte ou encore les fréquences radioélectriques attribuées).

L'établissement d'accueil peut fournir des renseignements sur les points suivants: logement, transports locaux, appui logistique quotidien, etc., mais n'est pas dans l'obligation de participer aux frais de logement du personnel.

6. Règles applicables pendant la comparaison

Le directeur de projet assure la surveillance de tous les essais. Il enregistre chaque lâcher de ballon, ainsi que tous les renseignements pertinents sur les radiosondes utilisées en vol et les conditions météorologiques.

Les modifications de matériel ou de logiciel sont autorisées à condition d'obtenir l'accord du directeur de projet. Il est nécessaire aussi d'en informer les autres participants. Le directeur de projet doit tenir un registre dans lequel il indique tous les équipements qui participent à la comparaison et toutes les modifications apportées.

Les petites réparations, tel le remplacement de fusibles, qui ne modifient pas les performances des instruments sont autorisées. Il faut en informer le directeur de projet qui les enregistre.

Les vérifications d'étalonnage et les opérations d'entretien du matériel auxquelles les participants doivent procéder et qui exigent la présence d'un spécialiste ou un équipement spécifique sont autorisées à condition d'être notifiées au directeur de projet.

Tout problème qui risque de nuire à l'intégrité des résultats de la comparaison ou de modifier les performances d'un équipement doit être porté à l'attention du directeur de projet.

7. Acquisition des données

Le comité d'organisation doit approuver les méthodes appropriées d'acquisition des données, notamment en ce qui concerne la fréquence des mesures, les intervalles d'échantillonnage, l'établissement de moyennes, la réduction des données (ceci pouvant se limiter à la capacité de chaque participant), leur forme de présentation, le contrôle de qualité en temps réel, le contrôle de qualité après analyse et les messages de données.

Avant le début de la comparaison, il convient de soumettre tous les matériels et les logiciels d'acquisition de données fournis par l'établissement d'accueil à des essais concluants.

Il incombe au directeur de projet de fixer avec l'accord de tous les participants le délai maximum entre l'exécution des observations et le moment où les données lui sont remises. On peut considérer comme adéquat un délai d'une heure après la fin des observations (éclatement du ballon).

Le directeur de projet se charge de la vérification des données avant analyse, des étapes du contrôle de qualité qui suivent et de la fourniture des données finales.

Il incombe au directeur de projet de choisir le support de stockage des données, en prenant en considération les moyens dont l'établissement d'accueil dispose, et sachant que le support utilisé pour renvoyer les données finales des essais aux participants peut varier suivant les moyens informatiques dont ceux-ci disposent. Le directeur de projet doit être au fait de ces exigences.

Il appartient au directeur de projet de fournir les données finales à tous les participants, ce qui exige de l'établissement d'accueil la possibilité de recevoir tous les fichiers de données des différents participants.

8. Traitement et analyse des données

8.1 Analyse des données

Il est bon de décider d'un cadre pour l'analyse des données, et ce, avant même le début de la comparaison. Ce cadre doit figurer dans le plan des essais.

Il doit y avoir accord entre les participants en ce qui concerne les méthodes de conversion des données, les algorithmes d'étalonnage et de correction, les termes et abréviations, les constantes et la description complète des méthodes d'analyse statistique proposées.

Il incombe au comité d'organisation de vérifier si les méthodes d'analyse appropriées ont été retenues.

Il incombe au comité d'organisation de passer en revue les résultats de la comparaison et d'examiner le contenu du rapport final et les recommandations qui y figurent.

8.2 Traitement des données et accès à la base de données

Toutes les données météorologiques et environnementales indispensables à la comparaison doivent être stockées dans une base de données en vue de leur utilisation et de leur analyse par les participants. Il incombe au directeur de projet de contrôler ces données.

Une fois la comparaison terminée, le directeur de projet fournit à chaque participant le jeu complet de toutes les données des différents participants.

9. Rapport final de la comparaison

Il incombe au directeur de projet de rédiger le projet de rapport final et de le soumettre au comité d'organisation et aux Membres participants pour recueillir leurs observations et leurs propositions de modifications. Il convient de préciser un délai de réponse.

Les observations et les modifications proposées doivent être communiquées au directeur de projet, avec copie au comité d'organisation.

Une fois qu'il est prêt, le projet de rapport final modifié est remis au comité d'organisation qui peut décider de se réunir pour un dernier examen, s'il y a lieu, ou d'approuver directement le document final.

Une fois que le document final a été approuvé par le comité d'organisation, il est envoyé au Secrétariat de l'OMM qui se charge de sa publication et de sa diffusion.

10. Dernières remarques

Le comité d'organisation peut convenir que les résultats intermédiaires pourront être présentés à l'occasion de conférences techniques uniquement par le directeur de projet, les participants pouvant en faire autant pour des jeux de données restreints ou l'ensemble de leurs propres données. Une fois que le Secrétariat de l'OMM a fixé la date de publication du rapport final, l'OMM communique les données à tous les Membres qui en font la demande. Les Membres sont alors libres d'analyser ces données et de présenter les résultats à l'occasion de réunions ou de les publier.

PARTIE II – DIRECTIVES SUR L’ÉTABLISSEMENT D’EMPLACEMENTS D’ESSAI

1. Introduction

Pour qu'il soit possible de garantir la constance des mesures effectuées par le système mondial d'observation en altitude, il est indispensable de maintenir la capacité de procéder à des comparaisons quantitatives de radiosondes. Il importe de vérifier régulièrement, dans des conditions réelles de vol, les systèmes opérationnels de radiosondes, qu'ils soient nouveaux ou en service, par comparaison avec des instruments de référence. Les Membres doivent donc veiller à maintenir en activité un minimum d'emplacements d'essai dotés de l'infrastructure voulue pour l'exécution de comparaisons de radiosondes.

L'expérience acquise lors des comparaisons de radiosondes organisées par l'OMM depuis 1984 montre qu'il faut disposer d'un ensemble divers d'emplacements permettant de comparer les radiosondes dans différentes conditions de vol.

Les performances des capteurs de l'humidité relative varient sensiblement en fonction des conditions rencontrées en vol d'essai, notamment la nébulosité et l'humidité durant l'ascension, mais aussi l'humidité en surface.

Les erreurs de température, pendant les vols diurnes, varient en fonction du rayonnement solaire et donc en fonction aussi de l'albédo des nuages et de celui de la surface terrestre. Les erreurs de température peuvent donc varier sensiblement suivant que le radiosondage a lieu à une station côtière ou à une station continentale. Les erreurs dues au rayonnement infrarouge absorbé par les capteurs de température varient en fonction non seulement des conditions en surface et de la nébulosité, mais aussi de la température de l'atmosphère. Ces erreurs seront donc différentes (notamment au niveau de la tropopause) suivant que le radiosondage est exécuté dans une région tropicale ou à une latitude moyenne.

Pour beaucoup de systèmes de mesure du vent en altitude, les erreurs enregistrées varient en fonction de la distance, tant horizontale que verticale, parcourue par le ballon à partir de l'emplacement du lâcher. Les essais de comparaison doivent donc reproduire des conditions en altitude de vent aussi bien faible que fort.

2. Installations requises

L'emplacement d'essai doit disposer d'une superficie de bureau suffisante pour accueillir le personnel

chargé de l'exploitation d'au moins quatre systèmes différents.

Il doit être équipé pour fournir des mesures en surface de la température, de l'humidité relative, de la pression et du vent, de bonne qualité, à proximité des aires de lâcher. Il est également bon de disposer de mesures complémentaires de bonne qualité, servant de référence, pour la température, la pression et l'humidité relative.

L'emplacement d'essai doit être équipé pour pouvoir fournir des mesures absolues de l'altitude géopotentielle au cours des vols d'essai (soit à l'aide d'un radar de poursuite ou de radiosondes à GPS capables de fournir des mesures exactes de cette altitude).

Il peut se révéler utile de disposer aussi de systèmes d'observation supplémentaires, tels que des célosmètres laser, des lidars de mesure des aérosols, des lidars de mesure de l'humidité relative, des radiomètres au sol et des interféromètres.

L'emplacement d'essai doit être agréé par l'administration nationale du contrôle aérien pour le lâcher de grands ballons (3 000 g) dotés d'une charge utile maximale de 5 kg. Les hangars à ballons doivent être suffisamment grands pour permettre le lâcher de ces grands ballons.

3. Régions géographiques proposées

Il est proposé de maintenir en activité ou de créer des emplacements d'essai dans les régions de latitude moyenne en Amérique du Nord, en Europe et en Asie, car il s'agit de régions relativement accessibles pour les principaux fabricants. L'idéal serait que chacune de ces régions dispose de deux emplacements au minimum, l'un représentant des conditions côtières (ou maritimes) et l'autre des conditions continentales.

Il est proposé en outre de trouver deux emplacements dans les régions tropicales, en particulier pour les essais de capteurs de l'humidité relative.

Si les principaux emplacements d'essai indiqués ci-dessus ne sont pas assez représentatifs de conditions extrêmes pour ce qui concerne le fonctionnement des capteurs de l'humidité relative (ex.: conditions très sèches à basse altitude), il pourrait se révéler nécessaire de trouver d'autres emplacements dans une zone aride ou dans une zone où l'on enregistre des températures très basses en surface (inférieures à -30°C en hiver).

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Brousaides, F.J. et J.F. Morrissey, 1974 : Residual temperature-induced humidity errors in the National Weather Service radiosonde. *Final Report AFCRL-TR-74-0111*, Instrument Paper No. 215.
- Cole, H. L. et E. Miller, 1995 : A correction for low-level radiosonde temperature and relative humidity Measurements. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, Caroline du Nord, pp. 32 à 36.
- Garand, L., C. Grassotti, J. Hallé et G.L. Klein, 1992 : On differences in radiosonde humidity-reporting practices and their implications for numerical weather prediction and remote sensing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 73, pp. 1417 à 1423.
- Kursinski, E.R., G.A. Hajj, J.T. Schofield, R.P. Linfield et K.R. Hardy, 1997 : Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, Volume 102, pp. 23429 à 23466.
- Leiterer, U., H. Dier, D. Nagel, T. Naebert, D. Althausen, K. Franke, A. Kats et F. Wagner, 2005 : Correction method for RS80-A Humicap humidity profiles and their validation by Lidar backscattering profiles in tropical cirrus clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 22, pp. 18 à 29.
- McIlveen, J.F.R. et F.H. Ludlam, 1969 : The lag of the humidity sensor in the British radiosonde. *Meteorological Magazine*, Volume 98, pp. 233 à 246.
- Miloshevich, L.M., H. Vömel, A. Paukkunen, A.J. Heymsfield et S.J. Oltmans, 2001 : Characterization and correction of relative humidity measurements from Vaisala RS80-A radiosondes at cold temperatures. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 18, pp. 135 à 156.
- Miloshevich, L.M. A. Paukkunen, H. Vömel et S.J. Oltmans, 2004 : Development and validation of a time-lag correction for Vaisala radiosonde humidity measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 21, pp. 1305 à 1327.
- Nash, J., 1984 : *Compatibility of Radiosonde Measurements in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere for the Period 1 November 1981 to 31 October 1982*. Meteorological Office, Bracknell, O.S.M. No. 24.
- Nash, J., J.B. Elms et T.J. Oakley, 1995 : *Relative humidity sensor performance observed in recent international radiosonde comparisons*. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, Caroline du Nord, pp. 43 à 48.
- Organisation météorologique mondiale, 1970 : *Performance Requirements of Aerological Instruments* (C.L. Hawson). Note technique N° 112, OMM-N° 267.TP.151, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1975 : *Upper-Air Sounding Studies. Volume I: Studies on Radiosonde Performance* (A.H. Hooper), Note technique N° 140, OMM-N° 394, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1986 : *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Rapport N° 21 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 175, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1987 : *WMO International Radiosonde Comparison (UK 1984, USA 1985): Final Report* (J. Nash et F.J. Schmidlin). Rapport N° 30 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 195, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : Valeurs de quelques fonctions et constantes physiques utilisées en météorologie. *Règlement technique*, Volume I, Appendice A, OMM-N° 49, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989a : SRS-400: The new Swiss radiosonde (B. Hoegger, A. Heimo, G. Levrat et J. Rieker). *Communications présentées à la quatrième Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECI-MO-IV)* (Bruxelles), Rapport N° 35 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 303, Genève, pp. 197 à 202.
- Organisation météorologique mondiale, 1989b : *Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements* (M. Kitchen). Rapport N° 36 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 344, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1991` : *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (URSS), 1989: Final Report* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash et N. Zaitseva). Rapport N° 40 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 451, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Vocabulaire météorologique international*. Deuxième édition, OMM-N° 182, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993a : *Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices* (D.J. Gaffen). Rapport N° 50 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 541, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993b : *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility*

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

Monitoring. Part A: WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1993), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1990, 1991 and 1992 (T. Oakley), Rapport N° 56 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 587, Genève.

- Organisation météorologique mondiale, 1994a : The difference in observed temperatures from radiosondes suspended 10 m and 40 m beneath a 1400 g balloon (J.B. Elms, J. Nash et G. Williams). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-94)*, Rapport N° 57 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 588, Genève, pp. 121 à 126.
- Organisation météorologique mondiale, 1994b : Comparison of potential reference radiosonde observations – Results from PREFRS-92 (J. Nash). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-94)*, Rapport N° 57 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 588, Genève, pp. 115 à 120.
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel des codes*. Volume I.1, OMM-N° 306, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1996a : *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV: Final Report* (S. Yagi, A. Mita et N. Inoue). Rapport N° 59 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 742, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1996b : *Description and User Guide for the Radiosonde Comparison and Evaluation Software Package (RSKOMP – Version 3/Version 4)* (S. Kurnosenko et T. Oakley). Rapport N° 60 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 771, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998 : *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring*. Part A: WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1998), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1995, 1996 and 1997 (T. Oakley), Rapport N° 72 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 886, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003a : *Manuel du Système mondial d'observation*. Volume I, OMM-N° 544, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003b : *WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members in 2002 and Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements for Period from 1998 to 2001* (J. Elms). Rapport N° 80 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1197, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003c : *Executive Summary of the WMO Intercomparison of GPS Radiosondes* (Alcantara, Maranhão, Brésil, du 20 mai au 10 juin 2001). Rapport N° 76 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1153, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2005a : *Preliminary results of WMO intercomparison of high quality radiosonde systems*, Maurice, février 2005 (B. Pathack, J. Nash, R. Smout et S. Kurnosenko). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-2005)*, Rapport N° 82 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1265, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2005b : *Results of the RS92 acceptance test performed by the Met Office (UK)* (R. Smout, J. Nash, T. Hewison et M. Smees). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-2005)*, Rapport N° 82 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1265, Genève.
- Paukkunen, A., 1995 : *Sensor heating to enhance reliability of radiosonde humidity measurement*. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Charlotte, Caroline du Nord, pp. 65 à 69.
- Richner, H., J. Joss et P. Ruppert, 1996 : A water hydrometer utilizing high-precision thermocouples. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 13, pp. 175 à 182.
- Schmidlin, F.J., H. Sang Lee et B. Ranganayakamma, 1995 : *Deriving the accuracy of different radiosonde types using the three-thermistor radiosonde technique*. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Charlotte, Caroline du Nord, pp. 27 à 31.
- Turner, D.D., B.M. Lesht, S.A. Clough, J.C. Liljegren, H.E. Revercomb et D.C. Tobon, 2003 : Dry bias and variability in Vaisala RS80-H radiosondes: The ARM experience. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 20, pp. 117 à 132.
- Turtiainen, H., S. Tammela et I. Stuns, 1995 : *A new radiosonde temperature sensor with fast response*

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

time and small radiation error. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Charlotte, Caroline du Nord, pp. 60 à 64.

- Wade, C.G., 1994 : An evaluation of problems affecting the measurement of low relative humidity on the United States radiosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 11, pp. 687 à 700.
- Wade, C.G., 1995 : *Calibration and data reduction problems affecting national weather service radiosonde*

humidity measurements. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Charlotte, Caroline du Nord, pp. 37 à 42.

- Wang, J., H.L. Cole, D.J. Carlson, E.R. Miller, K. Beierle, A. Paukkunen et T.K. Laine, 2002 : Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80 radiosonde: Application to TOGA-COARE data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 19, pp. 981 à 1002.

CHAPITRE 13

MESURE DU VENT EN ALTITUDE

13.1 GÉNÉRALITÉS

13.1.1 Définitions

Les définitions suivantes sont tirées du Manuel du Système mondial d'observation (OMM, 2003a) :

- *Observation par ballon-pilote* : Détermination des vents en altitude en suivant la trajectoire d'un ballon libre à l'aide d'un dispositif optique.
- *Observation de radiovent* : Détermination des vents en altitude en suivant la trajectoire d'un ballon libre par des moyens électroniques.
- *Observation de radiosondage-radiovent* : Observation combinée de radiosondage et de radiovent.
- *Observation en altitude* : Observation faite en atmosphère libre, directement ou indirectement.
- *Observation du vent en altitude* : Observation faite à une altitude donnée ou résultats d'un sondage complet de la vitesse et de la direction du vent dans l'atmosphère.

Ce chapitre traite surtout des observations par ballon-pilote et des observations de radiovent. Les techniques relatives aux ballons, l'emploi de plates-formes spéciales et d'équipements spécialisés ainsi que les mesures indirectes par télédétection sont étudiés dans divers chapitres de la Partie II.

13.1.2 Unités de mesure du vent en altitude

La vitesse des vents en altitude est généralement exprimée en mètres par seconde ou en noeuds, mais aussi parfois en kilomètres par heure. La direction d'où provient le flux d'air est donnée en degrés par rapport au nord. Dans les messages TEMP, on indique la direction à cinq degrés près. Cette résolution atténue l'exactitude rendue possible par les systèmes de mesure les plus modernes, en particulier lorsque les vents sont forts. Lorsque l'exactitude la plus élevée est nécessaire, on peut accroître l'exactitude des messages sur la direction du vent au moyen du code BUFR.

L'unité de géopotentiel employée pour situer, dans le plan vertical, les observations en altitude est le mètre géopotentiel standard (symbole : m), qui correspond à 0,980 665 mètre dynamique. À l'intérieur de la troposphère, la valeur de la hauteur géopotentielle est proche de la hauteur exprimée en mètres. Dans les messages d'observation du vent en altitude, la hauteur géopotentielle est donnée par rapport au

niveau de la mer même si, dans de nombreux systèmes, elle est mesurée au départ en fonction du niveau de la station.

13.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

13.1.3.1 Applications

Les observations de vents en altitude, éléments essentiels des prévisions météorologiques opérationnelles à toutes les échelles et à toutes les latitudes, sont généralement utilisées en conjonction avec des mesures du champ de masse (température et humidité relative). Elles sont primordiales pour assurer la sécurité et la rentabilité des activités aériennes. Dans le domaine militaire, les variations des vents en altitude sont un facteur important car elles limitent la précision de l'artillerie moderne. On a impérativement besoin de mesures exactes du vent en altitude et du cisaillement vertical pour le lancement d'engins spatiaux ou d'autres types de fusées et, dans la couche limite, pour les prévisions de pollution.

13.1.3.2 Amélioration des procédures de préparation des messages

Les mesures du vent en altitude sont généralement incorporées aux prévisions numériques du temps, sous forme de moyennes par couche, l'épaisseur des couches étant déterminée par l'échelle des mouvements atmosphériques. Elles ne sont généralement pas introduites aux pressions et hauteurs standard, mais plutôt à des niveaux de pression qui évoluent en fonction des variations barométriques en surface sur le lieu d'observation. Il est donc important de représenter avec exactitude, dans les messages d'observation des vents en altitude, la variation des vents entre les niveaux standard, en plus de fournir des mesures exactes du vent à ces niveaux.

Au départ, les données sur les vents en altitude étaient traitées manuellement ou à l'aide d'une petite calculatrice et il était extrêmement difficile de produire des messages détaillés sur la structure verticale du vent. La baisse du coût des systèmes informatiques a permis de traiter et de présenter toutes les données nécessaires aux activités météorologiques et à la recherche scientifique. Les messages d'observation des vents en altitude doivent renfermer assez d'informations pour définir le cisaillement vertical du vent à travers les limites qui séparent les diverses couches des champs de masse. Il faut, par exemple,

indiquer le cisaillement à travers les inversions de température ou le cisaillement important associé aux fortes variations de l'humidité relative dans le plan vertical, chaque fois que c'est possible.

Lorsqu'on utilise le code FM 35-X Ext. TEMP ou FM 32-IX PILOT (OMM (1995)) dans les messages, les vitesses des vents peuvent présenter des écarts allant jusqu'à 5 m s^{-1} par rapport à l'interpolation linéaire entre les niveaux importants. L'emploi d'algorithmes automatisés avec cette limite d'ajustement risque d'introduire dans les messages des erreurs plus importantes que les erreurs d'observation. De plus, il arrive parfois que la procédure de chiffrement réduise l'exactitude au point de ne plus respecter les exigences énoncées dans le chapitre 12. Cette situation peut être évitée de multiples manières. Il est ainsi possible d'adopter, comme norme nationale, une limite d'ajustement de la vitesse du vent de 3 m s^{-1} au lieu de 5 m s^{-1} pour les messages TEMP et PILOT. Le resserrement de cette limite se traduit, en moyenne, par la production d'un message d'observation de niveau important par kilomètre vertical. Les messages TEMP ou PILOT doivent être comparés visuellement aux mesures détaillées des vents en altitude. Avant leur diffusion, ils doivent être corrigés de manière à éliminer les erreurs d'ajustement inacceptables. L'emploi du code BUFR peut rendre inutile le choix de niveaux importants.

13.1.3.3 Exigences en matière d'exactitude

L'exactitude que doivent présenter les mesures de la vitesse et de la direction du vent en altitude est présentée à l'annexe 12.A du chapitre 12 de la Partie I. Le tableau 1 de l'annexe 12.B du chapitre 12, Partie I, récapitule les limites de performance des mesures en ce qui concerne les erreurs de vecteur standard. En outre, les erreurs systématiques portant sur la direction du vent doivent être réduites au minimum. Elles doivent être nettement inférieures à 5° , en particulier là où les vents en altitude sont généralement forts. En pratique, la plupart des systèmes de mesure opérationnels correctement entretenus permettent d'obtenir des données comportant une erreur de vecteur standard (2σ) supérieure ou égale à 3 m s^{-1} dans la basse troposphère et à 5 ou 6 m s^{-1} dans la haute troposphère et la stratosphère (Nash, 1994).

Le tableau 1 de l'annexe 12.B du chapitre 12, Partie I, présente la gamme des vitesses susceptibles d'être enregistrées en divers lieux. La plupart des systèmes de mesure du vent en altitude doivent couvrir un éventail de vitesses allant de 0 à 100 m s^{-1} . Il n'est peut-être pas nécessaire que les systèmes utilisés surtout pour les vents à basse altitude possèdent une telle capacité de mesure.

La résolution verticale indiquée au tableau 1 de l'annexe 12.B du chapitre 12, Partie I, relativement à la mesure du vent en altitude se situe entre 300 et 400 mètres dans la troposphère et entre 600 et 800 mètres dans la stratosphère. Une résolution plus élevée (50 à 150 mètres) peut s'avérer utile pour conduire des activités météorologiques générales dans la couche limite atmosphérique (jusqu'à 2 km au-dessus de la surface). Le système de poursuite doit toutefois être en mesure d'atteindre une exactitude acceptable pour cette résolution afin que les résultats obtenus soient intéressants.

Dans l'annexe 12.A du chapitre 12, Partie I, les exigences les plus strictes en matière de mesure du vent en altitude concernent les observations des mouvements atmosphériques à moyenne échelle. De plus, une très grande exactitude est souvent nécessaire pour les opérations à grande distance comme le lancement de fusées. Les programmes d'observation devant satisfaire une spécification de exactitude très élevée requièrent une planification soigneuse car les observations doivent se dérouler à proximité du site choisi et à l'intérieur d'une période donnée. Il convient de considérer la caractéristique suivante de la variabilité atmosphérique: les différences vectorielles quadratiques entre deux observations exemptes d'erreur effectuées à la même hauteur (échantillonées selon une résolution verticale de 300 mètres) sont généralement inférieures à $1,5 \text{ m s}^{-1}$ si les mesures sont réalisées simultanément et si elles sont séparées de moins de 5 km environ dans le plan horizontal. Cela vaut également si les mesures sont effectuées au même endroit, avec un intervalle inférieur à 10 minutes environ.

13.1.3.4 Exigences en matière de hauteur maximale

Il peut être nécessaire de mesurer les vents en altitude au moyen d'un équipement fixé à un ballon, de la manière indiquée dans ce chapitre, jusqu'à des hauteurs de 35 km et plus sur certains sites, en particulier ceux désignés dans le cadre du Système mondial d'observation du climat. Les ballons capables d'atteindre de telles hauteurs risquent d'être plus coûteux que les petits ballons qui emportent les systèmes de sonde de radiovent jusqu'à 20 ou 25 kilomètres.

Idéalement, un réseau d'observation des vents en altitude doit échantillonner correctement toutes les échelles de mouvement, de l'échelle planétaire à l'échelle moyenne, dans la troposphère et la basse stratosphère. Il doit par ailleurs identifier les structures de vent importantes à petite échelle à l'aide de systèmes de télédétection à résolution temporelle élevée. Toutefois, dans la moyenne et haute stratosphère, les échelles prédominantes observées pour

les besoins météorologiques sont plus grandes. Ce sont principalement l'échelle planétaire et l'échelle synoptique. Ainsi, les mesures à plus de 25 km de hauteur ne sont peut-être pas utiles à tous les sites d'observation en altitude d'un réseau national dont l'espacement est optimisé en vue d'observations troposphériques. On peut réduire les frais d'exploitation globaux en utilisant à la fois les systèmes d'observation présentés dans ce chapitre et les systèmes de détection décrits dans la Partie II. Dans ce cas, l'infrastructure technique nationale doit être en mesure d'assurer convenablement l'entretien des différents systèmes déployés.

13.1.4 Méthodes de mesure

Les mesures du vent en altitude sont surtout réalisées à l'aide de sondes de radiovent. On peut aussi effectuer des observations par ballon-pilote et radiovent si l'on veut éviter le coût de lancement d'une radiosonde. Les observations effectuées à partir des stations en altitude du Système mondial d'observation sont complétées, sur les terres émergées, par des mesures provenant d'aéronefs, de profileurs de vent et de radars météorologiques Doppler. Au-dessus des océans, les informations sur les vents en altitude sont surtout recueillies par des avions civils circulant à vitesse de croisière. Ces données sont accompagnées de profils verticaux, fournis par les sondes de radiovent lancées à partir de navires ou d'îles éloignées, et d'observations des nuages ou des structures de la vapeur d'eau faites à partir de satellites météorologiques géostationnaires. À l'avenir, les mesures du vent au moyen de systèmes de détection et de localisation par la lumière (lidars) et de radars placés à bord de satellites devraient améliorer la couverture mondiale des réseaux d'observation. On emploie également des sondeurs acoustiques (sodars), des lidars et des anémomètres fixés à des cerfs-volants en vue d'obtenir des mesures à résolution temporelle élevée pour des applications particulières. Des aéronefs sans pilote bon marché pour les besoins météorologiques sont en cours de mise au point.

Les méthodes de mesure de la vitesse et de la direction du vent en altitude par sonde de radiovent reposent souvent sur l'observation du mouvement d'un ballon libre montant à une vitesse plus ou moins uniforme ou d'un objet tombant sous l'effet de la pesanteur, par exemple une catasonde. Comme on cherche à mesurer le mouvement horizontal de l'air, la cible ne doit pas posséder de mouvement notable dans ce plan par rapport à l'air. Les informations essentielles recueillies par les systèmes de poursuite directe sont la hauteur de la cible et sa position dans le plan ou sa vitesse horizontale à des intervalles de temps connus. Les exigences en matière d'exactitude de l'annexe 12.A du chapitre 12, Partie

I, comprennent l'effet des erreurs touchant la hauteur ou la pression attribuées à la mesure du vent. Au-dessus de la couche limite atmosphérique, on a peu de chances de respecter les normes d'exactitude habituelles si la hauteur est déduite de la vitesse ascensionnelle supposée du ballon et non pas mesurée par le système de poursuite ou la radiosonde fixée à la cible.

Les systèmes de télédétection mesurent les mouvements de l'atmosphère par la diffusion du rayonnement électromagnétique ou des ondes sonores provenant d'une ou de plusieurs cibles (hydrométéores, poussières, aérosols) ou par les variations de l'indice de réfraction dues à la turbulence atmosphérique à petite échelle ou aux molécules d'air elles-mêmes.

Les méthodes directes de mesure du vent étudiées dans ce chapitre consistent à suivre en permanence la position de certaines cibles. Il existe un grand nombre de techniques de poursuite mais nous n'examinerons ici que deux des plus courantes.

13.1.4.1 Poursuite à l'aide d'une antenne directive

Dans cette méthode, le système terrestre suit la cible au moyen d'une antenne directive qui mesure l'azimut et deux des trois paramètres suivants : l'angle de site, la distance oblique et la hauteur. Les mesures peuvent être obtenues avec un radar primaire (voir section 13.2.4), qui poursuit une cible réflectrice fixée à un ballon, un radiothéodolite ou un radar secondaire (voir section 13.2.4.2) observant une radiosonde emportée par un ballon ou un théodolite optique qui suit la trajectoire d'un ballon. Les systèmes à radar et radiothéodolite offrent généralement une exactitude d'environ 0,1° pour le site et l'azimut. En principe, pour un système radar, l'erreur de distance doit être inférieure à 30 mètres.

Les radiothéodolites modernes ayant des antennes de moins de 2 m conviennent parfaitement à la mesure du vent en altitude lorsque la hauteur du ballon reste supérieure à 10 ou 15°. Les radars primaires exigent un personnel qualifié pour l'entretien et des investissements plus élevés. Ils permettent toutefois d'effectuer des mesures par radiovent à faible coût lorsqu'il n'est pas nécessaire d'utiliser de radiosonde. Les radars primaires peuvent par ailleurs répondre à des exigences d'exactitude très élevées dans toutes les conditions. Les systèmes dotés d'un radar secondaire de bonne qualité constituent une autre possibilité, mais pour obtenir un bon fonctionnement, le spectre des fréquences radioélectriques dans les «bandes des auxiliaires de la météorologie» risque d'être trop étendu pour être utilisable dans de nombreux pays.

Tableau 13.1. Fréquence de dépassement de certaines distances obliques (ballon situé à 30 km)

Distance oblique dépassée (km)	140	160	175	190
Fréquence (pour cent)	5	2	1	0,5

Le choix entre un radar primaire et un radiothéodolite est déterminé en partie par la distance oblique maximale dont on a besoin sur le site d'observation. Un système de mesure du vent en altitude utilisant un radar primaire ou des signaux de radionavigation est essentiel pour obtenir une bonne exactitude à de grandes distances. La portée maximale varie considérablement selon la latitude : 70 km pour les régions équatoriales et polaires, 200 km et plus dans certaines zones tempérées des latitudes moyennes. Le tableau 13.1 montre la fréquence de dépassement de certaines distances obliques avec un ballon situé à 30 km. Les données concernent des stations européennes situées entre 50° N et 60° N. Les proportions sont valables pour une année entière mais il faut souligner que les sondages qui excèdent les limites ont été effectués principalement en hiver.

13.1.4.2 Poursuite à l'aide de signaux de radionavigation

Une radiosonde capable de recevoir les signaux provenant d'un système d'émetteurs de radionavigation est fixée à une cible (ballon en ascension ou catasonde). Les variations de phase, de même que le décalage Doppler ou le moment d'arrivée des signaux de radionavigation à la radiosonde, servent à calculer le mouvement horizontal de la cible. La méthode de mesure à l'aide de radiobalises de surface telles que Loran est décrite dans OMM (1985). Les fabricants de radiosondes proposent, depuis 1995, des appareils fonctionnant avec le système de positionnement global (GPS) par satellite (OMM (1994) et Kaisti (1995)). Il a fallu un certain temps pour obtenir un fonctionnement fiable, mais la plupart des grands problèmes avaient été résolus au moment de la comparaison OMM de radiosondes GPS organisée au Brésil (OMM (2003b)). Actuellement, la mesure des hauteurs par des systèmes GPS à corrélation des codes est suffisamment précise pour remplacer les capteurs de pression des radiosondes modernes.

On a de plus en plus recours à des systèmes de poursuite par des signaux de radionavigation pour mener les activités météorologiques courantes, en raison du degré élevé d'automatisation possible avec ce type de système de mesure du vent. L'entretien de l'équipement au sol est, par ailleurs, minime.

L'exactitude des mesures du vent effectuées à l'aide d'un système de radionavigation utilisant des émet-

teurs terrestres dépend de la géométrie, de la phase, de la stabilité et du rapport signal/bruit des signaux en un lieu donné. Elle ne varie généralement pas trop en cours de vol tant que la réception des signaux par la radiosonde et des données transmises par la radiosonde au système de traitement au sol demeure adéquate. Les radiosondes ont souvent du mal à recevoir des signaux fiables immédiatement après le lancement.

La qualité des mesures peut se dégrader si les vents sont très forts et si la réception des signaux transmis par la radiosonde au système terrestre est mauvaise. L'accumulation de charge électrostatique sur l'antenne de la radiosonde, causée par des orages ou des nuages de glace, provoque souvent de longues périodes de perte de signal quand on utilise les systèmes de radionavigation Loran. L'antenne se décharge normalement plus tard dans le vol, ce qui permet à nouveau des mesures valables. Ce problème ne se pose pas dans le cas des radiosondes équipées du GPS.

13.2 CAPTEURS ET INSTRUMENTS DE MESURE DU VENT EN ALTITUDE

13.2.1 Théodolite optique

On peut suivre la trajectoire des ballons avec un théodolite optique quand il n'est pas nécessaire de procéder à des mesures par radiovent. Les opérateurs doivent être hautement qualifiés et compétents afin que les erreurs de mesure n'augmentent pas rapidement lorsque le ballon s'élève au-dessus de la couche limite.

Le système optique du théodolite doit être tel que l'axe de l'oculaire demeure horizontal quelle que soit la direction de pointage de la lunette. Il est préférable d'utiliser un prisme pentagonal plutôt qu'un prisme à angle droit car un léger déplacement du premier ne modifie pas la perpendicularité des deux pièces de l'axe optique.

L'oculaire de la lunette doit être muni de fils croisés ou d'un réticule, avec un grossissement de 20 à 25 et un champ d'au moins 2°. La monture du théodolite doit être robuste. Il doit être possible de tourner celui-ci rapidement à la main ou lentement, à l'aide d'un engrenage à friction ou à vis sans fin, sur les cercles d'azimut et de site. Ces cercles doivent comporter des divisions de 1° maximum et être dotés de verniers ou de volants de micromètre permettant de lire les angles avec une exactitude de 0,05° et de les évaluer à 0,01° près. Les échelles sont disposées et éclairées de façon à permettre la lecture de jour com-

me de nuit. Le jeu dans les engrenages des cercles ne doit pas dépasser $0,025^\circ$. Les erreurs de collimation horizontale et verticale sont limitées à $0,1^\circ$.

Le théodolite doit être muni de pinnules pour faciliter le suivi d'un ballon se déplaçant rapidement. Une lunette secondaire avec un champ d'au moins 8° est également utile dans ce but.

La base du théodolite doit s'adapter à un trépied standard ou à tout autre support et se régler pour une mise à niveau précise. Il est important de pouvoir ajuster les supports en fonction de la taille de l'observateur. L'instrument doit être robuste et protégé contre la corrosion.

13.2.2 Systèmes de radiovent

Les systèmes de radiovent ont été conçus à l'origine pour mesurer les vents en présence de nuages. Ils sont aussi très précis à de grandes distances, lorsque les ballons sont suivis jusqu'à des hauteurs de 30 km. Il est nécessaire aujourd'hui d'utiliser ces systèmes pour satisfaire la majorité des exigences modernes en matière d'exactitude. Le degré élevé d'automatisation permis par les technologies récentes a éliminé toute intervention humaine dans la plupart des étapes du cycle de mesure. On peut ainsi réduire le coût des activités météorologiques.

13.2.3 Radiothéodolite

Le radiothéodolite est particulièrement efficace lorsque le ballon reste pendant tout le vol à une hauteur élevée par rapport à la station terrestre. Si cette hauteur est supérieure à 16° environ, il est possible de respecter la plupart des exigences d'exactitude du chapitre 12 de la Partie I avec des antennes de poursuite relativement petites. À des hauteurs plus faibles, les erreurs de mesure augmentent rapidement avec la diminution de l'angle de site, même en utilisant des antennes plus grandes (voir section 13.5.3). Il est extrêmement difficile de satisfaire les exigences du chapitre 12 de la Partie I avec un radiothéodolite si les vents en altitude sont constamment très forts, à moins d'employer un transpondeur pour mesurer la distance oblique (voir section 13.2.4.2).

Un radiothéodolite suit généralement les signaux émis par une radiosonde suspendue à un ballon météorologique. Une antenne directive couplée à un récepteur radio tourne sur les axes vertical et horizontal à l'aide de servomécanismes pour capter des signaux d'intensité maximale. La radiofréquence employée est généralement de 1 680 MHz. Une bonne antenne d'un diamètre d'environ deux mètres doit posséder des lobes secondaires de faible sensibilité par rapport au faisceau principal; on peut

ainsi obtenir une exactitude de $0,1^\circ$. Dans ce cas, le radiothéodolite peut suivre un ballon à des hauteurs situées entre 6 et 10° sans interférence entre les signaux reçus directement de la radiosonde et ceux réfléchis par les surfaces adjacentes. Ce type de perturbation, appelé brouillage dans la propagation par trajets multiples, limite souvent la capacité de poursuite des radiothéodolites à faible hauteur. L'importance de ce brouillage dépend essentiellement du positionnement de l'antenne par rapport à des surfaces réfléchissantes voisines, que le radiothéodolite soit placé sur un toit ou sur le sol.

Il convient d'obtenir auprès du fabricant, avant l'achat, une description détaillée du rendement de l'antenne du radiothéodolite, du système de détection, des servocommandes et des algorithmes de traitement des données. Les radiothéodolites portatifs modernes dotés d'une antenne de moins de deux mètres peuvent souffrir de problèmes de brouillage dans la propagation par trajets multiples jusqu'à des hauteurs de 16° . Lorsque cela se produit, le signal maximal n'est généralement pas obtenu dans la direction du ballon. Les erreurs de hauteur varient dans le temps à mesure que les conditions de brouillage évoluent avec le déplacement de la radiosonde, ce qui peut provoquer de fortes erreurs systématiques dans la mesure du vent (plus de 10 m s^{-1}).

Pendant la poursuite de la radiosonde, les angles d'azimut et de site sont transmis du radiothéodolite à l'ordinateur du système terrestre. Les mesures fournies par la radiosonde donnent la variation dans le temps de la hauteur géopotentielle correspondant aux directions observées. On peut en déduire la vitesse de changement de position du ballon. L'ordinateur affiche les mesures du vent en altitude sous forme de tableau ou de graphique. La continuité des vents dans le plan vertical permet à l'opérateur de dépister les erreurs de suivi. Quand les valeurs sont jugées satisfaisantes, le message d'observation est transmis aux utilisateurs.

Les ballons inversent parfois leur trajectoire en fonction des vents de surface et repassent au-dessus du radiothéodolite peu de temps après leur lancement, même si le ballon est lancé dans le vent par rapport au radiothéodolite. Pour continuer à poursuivre automatiquement et précisément un ballon dans ces conditions, le radiothéodolite doit présenter des vitesses de balayage très élevées en azimut et en site. Il faut alors des spécifications mécaniques plus sévères que celles nécessaires pour la plupart des vols quand le ballon est à grande distance. Afin d'alléger ces spécifications, certains radiothéodolites récents comportent un dispositif de poursuite interférométrique. Dans ces systèmes, l'interféromètre compare la phase des signaux qui parviennent à différentes sections de

l'antenne de poursuite pour déterminer la position de la source d'émission par rapport à l'orientation de l'antenne. En pratique, les données de phase sont échantillonnées à grande vitesse à l'aide de micro-processeurs pendant qu'un simple servomécanisme oriente approximativement l'antenne dans la direction voulue. Cela permet d'obtenir un bon rapport signal/bruit et de réduire au minimum les réflexions en provenance du sol. On calcule ensuite le site et l'azimut à partir d'une combinaison de positions de l'antenne et l'interféromètre déduit la direction vers la source à partir des mesures de phase. L'exactitude obtenue est identique à celle offerte par les meilleurs radiothéodolites standard. Les systèmes de poursuite par radiothéodolite interférométrique devraient avoir un rendement plus fiable et, par conséquent, être d'un entretien moins coûteux.

13.2.4 Radar

La caractéristique essentielle de la technique de poursuite radar, qui la distingue du radiothéodolite, est la mesure directe de la distance oblique avec l'azimut et le site. Un radar primaire détecte les impulsions des ondes radioélectriques ultracourtes réfléchies par une cible transportée par un ballon. Avec un radar primaire fiable, on peut satisfaire les exigences d'exactitude du chapitre 12 de la Partie I dans presque toutes les circonstances. Des normes encore plus élevées peuvent être respectées à l'aide de radars de poursuite haute précision. Pour obtenir une exactitude supérieure à 1 m s^{-1} environ, il faut employer des ballons à surface en relief (très coûteux) plutôt que des ballons météorologiques standard.

Le radar primaire est capable de suivre les ballons sans radiosonde. On peut donc réaliser des économies appréciables en réduisant les achats de radiosondes, à condition toutefois qu'il existe une structure de soutien technique adéquate pour l'entretien du radar et que les frais de main-d'œuvre soient très bas. Toutefois, dans de nombreux pays, les coûts de remplacement et d'exploitation des radars, plus élevés que ceux des systèmes de mesure du vent à l'aide de signaux de radionavigation, ont conduit à une diminution de l'utilisation des radars primaires pour les activités météorologiques courantes.

La plupart des systèmes de poursuite radar comprennent un modulateur, un oscillateur radioélectrique, un système d'antenne de localisation de la direction, un récepteur et une unité de traitement des données qui fournit la distance oblique, l'azimut et le site à un ordinateur de station terrestre. Le modulateur produit des impulsions de tension élevée, d'une durée approximative de $1 \mu\text{s}$, à un rythme de 400 à 1 000 impulsions/seconde. Ces impulsions activent un magnétron qui génère plu-

sieurs centaines de kilowatts à ultra-haute fréquence. L'énergie est transmise par un guide d'ondes au foyer d'un réflecteur paraboloïdal. Lorsque ce dernier est dirigé vers la cible du ballon, les impulsions sont renvoyées vers le même système d'antenne et converties par le récepteur. On mesure le temps écoulé entre l'émission des impulsions par le magnétron et la réception du signal réfléchi par la cible. Les résultats sont convertis pour obtenir la distance oblique de la cible, après compensation des délais de signaux dans les circuits électroniques de détection.

On utilise des longueurs d'onde de 3,2, 5,7 et 10,6 cm. Avec la plus courte longueur d'onde, une petite antenne suffit pour obtenir l'exactitude voulue, ce qui abaisse le coût du radar correspondant. L'affaiblissement du signal est toutefois plus important à 3,2 cm qu'à 10,6 cm dans des conditions de forte pluie. Quand ces conditions sont courantes, il faut plutôt avoir recours à de grandes longueurs d'onde pour assurer en permanence des observations adéquates à des distances éloignées.

13.2.4.1 Réflecteurs radar

La cible la plus efficace pour les longueurs d'onde indiquées ci-dessus est le réflecteur en trièdre, qui comprend essentiellement trois surfaces planes conductrices disposées perpendiculairement. Dans l'un des modèles, la surface supérieure, qui est à l'horizontale pendant le vol, est de forme carrée. Pour les grandes distances, on emploie un réflecteur à trois pignons qui peut tourner sur lui-même. Cela élimine les risques d'avoir, pendant un temps appréciable, une réflectivité nulle de la cible observée par le radar. Le poids et la résistance en vol doivent être les plus réduits possibles. Il faut que la cible soit pliable pour faciliter l'entreposage et le transport.

L'énergie interceptée par un trièdre dans le faisceau radar est directement proportionnelle au carré de la dimension linéaire du réflecteur. Selon la théorie générale des radars, le rapport énergie reçue/énergie transmise par le radar est directement proportionnel au carré de la dimension du réflecteur et inversement proportionnel à la distance oblique radar-réflecteur à la puissance quatre. Le réflecteur choisi doit être assez grand pour assurer un suivi précis aux plus grandes distances, dans les conditions météorologiques prévues. Lorsque les vents en altitude sont faibles, on peut employer des cibles plus petites et moins coûteuses.

Le rendement des réflecteurs en trièdre dépend, dans une certaine mesure, de la longueur d'onde. Avec les radars à courte longueur d'onde (3 cm), l'énergie renvoyée par une cible donnée est plus grande, ce qui permet l'emploi de systèmes à faible puissance.

Toutefois, l'affaiblissement du signal et l'immersion de la cible en cas de pluie sont plus importants pour ces longueurs d'onde.

Les réflecteurs en trièdre de 0,5 à 1 m conviennent à la plupart des applications. La taille des réflecteurs donnée ici est la longueur de la droite extérieure (hypoténuse) des triangles les constituant. Les surfaces conductrices sont constituées de feuilles métalliques collées à du papier ou à du polystyrène expansé, de tissu métallisé à mailles d'environ 0,5 cm ou de mylar métallisé. Elles doivent bien laisser passer l'électricité. Une résistance inférieure à 20Ω entre des points espacés de 30 cm donne de bons résultats. Une fois assemblées, les surfaces de la cible doivent être planes, avec une tolérance de 0,6 cm, et perpendiculaires à 1° près.

13.2.4.2 Transpondeurs

Dans les systèmes à radar secondaire, les impulsions d'énergie émises par la station terrestre sont reçues par un répondeur fixé à un ballon. Il peut s'agir d'un transpondeur distinct ou d'un dispositif intégré au système de radiosonde de base. Il n'est pas absolument nécessaire que la fréquence du signal de retour soit la même que celle du signal de sortie. Le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion et la réaction du répondeur fournit une mesure directe de la distance oblique.

Cette technique présente l'avantage de permettre la poursuite à de plus grandes distances que le radar primaire pour une puissance de sortie donnée de l'émetteur terrestre. En effet, l'énergie transmise par le répondeur est indépendante de l'énergie reçue de l'émetteur terrestre et généralement plus élevée que celle-ci.

Ainsi, l'énergie qui parvient au récepteur terrestre est inversement proportionnelle au carré de la distance oblique de la cible. Dans le cas d'un radar primaire, l'énergie reçue est inversement proportionnelle à la distance oblique à la puissance quatre.

Toutefois, si l'on doit effectuer de nombreuses mesures de radiovent sans mesures simultanées par radiosonde en un lieu donné, le coût des produits consommables est plus élevé avec un radar secondaire qu'avec un radar primaire. Le choix du radar primaire peut alors s'avérer plus judicieux.

La complexité et l'entretien des radars secondaires se situent généralement entre celles des radiothéodolites et celles des radars primaires.

13.2.5 Systèmes de poursuite à l'aide de signaux de radionavigation

Dans ces systèmes, la radiosonde comprend une antenne qui capte les signaux provenant d'un système

de radionavigation. Ce dernier est exploité par des agences indépendantes des Services météorologiques nationaux. Son but premier est généralement l'aide à la navigation aérienne et maritime civile ou militaire. Les systèmes de radionavigation employés couramment pour la mesure du vent sont les systèmes Loran à émetteurs terrestres ainsi que le système GPS par satellite.

Afin de réduire au minimum le coût du traitement des signaux de radionavigation dans la radiosonde, la plus grande partie du traitement permettant de mesurer le vent est effectuée après le renvoi des signaux au système terrestre. Il est donc essentiel de bénéficier d'une bonne réception dans ce type de système; les antennes terrestres doivent être situées de manière à offrir une bonne visibilité directe des radiosondes dans toutes les directions. De plus, la radiosonde doit être conçue de telle manière qu'une mauvaise modulation de la fréquence porteuse par les signaux de radionavigation ne coupe pas la liaison entre la radiosonde et la station.

L'exactitude des mesures du vent en altitude atteinte avec ce type de système varie selon l'emplacement géographique et les signaux de navigation utilisés. La mesure du vent par GPS est plus précise que sa mesure par la plupart des autres systèmes opérationnels. Tant qu'il y a suffisamment de signaux pour assurer la navigation, l'exactitude est semblable à celle obtenue avec les radiothéodolites et les radars.

L'un des principaux avantages de l'exploitation des signaux de radionavigation est la simplicité du système terrestre, qui ne comprend pas de pièces mobiles et qui ne nécessite pas un alignement très précis des antennes de poursuite. Ils peuvent donc être déployés à bord d'aéronefs et de navires, ainsi que sur des sites terrestres.

Dans les systèmes terrestres, la hauteur attribuée aux mesures du vent en altitude est la hauteur géopotentielle de la radiosonde. Il est essentiel que l'heure des données de vent traitées au niveau du système terrestre corresponde bien à l'heure des mesures de la hauteur de la radiosonde.

13.2.5.1 Disponibilité à venir de signaux de radionavigation

Un profond changement s'est produit dans la disponibilité des signaux de radionavigation. Le système Omega à très basse fréquence (VLF) a été mis hors service. Pour les activités internationales de navigation, on utilise maintenant en grande partie les signaux émis par le réseau de satellites GPS en orbite autour de la Terre. Ces signaux ont largement remplacé ceux provenant d'émetteurs terrestres fixes. Toutefois, pour diverses raisons, certains pays

continuent à employer des systèmes de navigation terrestres pour les besoins régionaux ou nationaux. Il faut donc s'enquérir auprès des responsables de la navigation de la disponibilité à venir des signaux avant d'envisager tout investissement à long terme dans un système donné.

Le calcul des vents à l'aide du réseau GPS est plus complexe qu'avec les signaux de radionavigation provenant d'émetteurs terrestres car les satellites changent constamment de position par rapport aux radiosondes. Le système de mesure du vent doit pouvoir déterminer en permanence les signaux reçus ainsi que la position et le mouvement des satellites. Les signaux GPS sont émis à une fréquence radioélectrique beaucoup plus élevée que les signaux Loran-C. Par conséquent, ils doivent subir un prétraitement plus poussé au niveau de la radiosonde avant d'être transmis au récepteur terrestre. La radiosonde doit donc posséder une capacité de traitement accrue. L'exactitude des mesures du vent au moyen du GPS est plus élevée que celle obtenue avec de bons radars primaires.

13.2.5.2 Réseaux à fréquence myriamétrique (VLF)

Le réseau de navigation russe Alpha fonctionne en VLF. Il existe aussi un nombre limité d'autres transmissions VLF régulières suffisamment stables pour servir à la mesure des vents. Toutefois, avant d'investir dans un équipement de ce type, il faut s'assurer de la disponibilité quotidienne des signaux pendant encore un certain nombre d'années.

Aux fréquences choisies (longueurs d'onde de 22 à 30 km), l'ionosphère et la surface de la Terre font office de guide d'ondes. Les émetteurs VLF excitent divers modes de propagation dont les amplitudes et les vitesses de phase varient en fonction de la hauteur de l'ionosphère, de la direction de propagation et de la portée d'émission. En raison de la présence de nombreux modes d'ordre élevé, la phase du signal est difficile à prévoir et à exploiter à moins de 1 000 km environ de l'émetteur. Au delà, la phase est une fonction linéaire utile de la distance. La hauteur de l'ionosphère subit une variation diurne. Ainsi, la phase reçue à un emplacement donné en provenance d'un émetteur fixe fluctue, en particulier si le lever ou le coucher du soleil intervient sur la plus grande partie du trajet entre l'émetteur et le récepteur. Des problèmes sporadiques de propagation des signaux surviennent quand l'ionosphère est perturbée par les rayons X et par les flux de particules émanant du soleil, les anomalies les plus fréquentes étant enregistrées à la fin du cycle de 11 ans d'activité des taches solaires.

Les signaux VLF captés par l'antenne de la radiosonde servent à moduler la fréquence porteuse de cette dernière. Ils sont reconstitués après réception et envoyés au dispositif de poursuite du système terrestre. Les vitesses de variation de phase des signaux VLF reçus par les radiosondes sont calculées par rapport à un signal de référence interne. Avec des calculs hyperboliques standard, le signal de référence ne doit présenter qu'une stabilité modérée et l'emploi d'un oscillateur à quartz de grande qualité donne des résultats satisfaisants.

13.2.5.3 Chaînes Loran-C

Le système Loran-C est un système d'aide à la navigation longue portée d'une exactitude relativement élevée qui fonctionne dans la bande kilométrique centrée sur 100 kHz (longueur d'onde de 3 km). Conçu pour faciliter la navigation maritime, en particulier dans les zones côtières et les régions du plateau continental, il ne couvrait au départ que certaines parties du globe, principalement dans l'hémisphère Nord. Au cours des dernières années, la plupart des émetteurs se trouvant à l'extérieur des zones côtières d'Amérique du Nord ont changé de propriétaire et des stations ont été fermées. Certaines chaînes ont été reconstituées par les nouveaux propriétaires en vue de former des réseaux régionaux de navigation maritime. En Amérique du Nord, les chaînes Loran-C sont en cours de modernisation et d'automatisation.

Une transmission Loran-C comprend des groupes de huit ou neuf impulsions de la porteuse de 100 kHz, d'une durée de 150 µs chacune. Chaque chaîne d'émetteurs comprend une station maîtresse et au moins deux stations asservies. En principe, la cohérence de la chaîne est assurée par référence à la transmission maîtresse. Chaque station asservie émet régulièrement ses groupes d'impulsions après la station maîtresse, à une fréquence propre à la chaîne. Cette fréquence est généralement de 100 ms.

Les signaux Loran-C se propagent par ondes de sol et ondes ionosphériques. La propagation des ondes de sol est relativement stable. Les corrections de phase, très réduites, varient selon que les signaux se propagent sur la terre ou sur la mer. La vitesse de changement des corrections de phase pendant le déplacement de la radiosonde n'est pas assez importante pour influer sur l'exactitude des mesures du vent. La propagation par ondes ionosphériques est plus variable car elle dépend de la position de l'ionosphère et change selon l'heure du jour. Sur ondes de sol, les signaux sont plus puissants que sur ondes ionosphériques, mais ces dernières s'affaiblissent beaucoup moins rapidement. La situation est idéale pour mesurer les vents avec le système Loran-C lorsque les signaux reçus par la radiosonde en provenance

de tous les émetteurs sont dominés par les ondes de sol. On peut obtenir ces conditions dans certaines parties des zones de service, mais non à tous les emplacements de la couverture théorique.

Les radiosondes Loran-C captent les signaux sur leur propre antenne puis modulent la fréquence porteuse afin de transmettre les signaux au récepteur. Le dispositif de poursuite Loran utilisé pour détecter l'heure d'arrivée des impulsions doit être en mesure de différencier jusqu'à un certain point les signaux sur ondes de sol des signaux sur ondes ionosphériques. Ce résultat peut être obtenu en captant l'heure d'arrivée du front avant des impulsions. Les dispositifs modernes de poursuite Loran peuvent fonctionner en mode interchaîne, ce qui permet d'utiliser les signaux de plusieurs chaînes à la fois. Cette capacité est essentielle pour obtenir des mesures du vent de bonne qualité dans de nombreuses parties des zones de service Loran-C. Les vents sont calculés à partir de la vitesse de variation des écarts dans l'heure d'arrivée entre les paires d'émetteurs. Dans les calculs, on emploie tous les signaux fiables disponibles plutôt qu'un minimum de trois.

Les systèmes de mesure du vent à l'aide de signaux Loran-C ont été largement utilisés pour la recherche météorologique en Amérique du Nord et en Europe et pour les activités météorologiques dans le nord-ouest de l'Europe. Les modifications apportées à la configuration des chaînes Loran-C en tant qu'émetteurs, qui ont dû être remis en état, ont mis en lumière la nécessité de doter les dispositifs de poursuite d'une capacité d'adaptation aux nouvelles configurations au moyen de réglages logiciel plutôt que par le remplacement du matériel.

13.2.5.4 Système de positionnement global (GPS)

Le GPS est un système de radionavigation de très grande précision fonctionnant à partir de signaux radio transmis par une constellation de 25 satellites tournant en orbite autour de la Terre sur six plans. Chacun des plans orbitaux coupe l'équateur selon un espacement de 60° et présente une inclinaison de 55° par rapport à l'axe polaire. Les satellites ont une période orbitale d'environ 11 heures 58 minutes. La constellation de satellites est configurée de façon à ce qu'il y ait toujours au moins quatre satellites visibles en tout lieu de la planète. Dans certains cas, il peut y en avoir huit.

Les signaux provenant des satellites sont contrôlés par des étalons de fréquence atomiques assurant une stabilité de plus de $1 \cdot 10^{-13}$. Chaque satellite transmet deux codes de portée numériques pseudo-aléatoires uniques, en plus d'informations telles que les éphémérides des satellites et des astres, l'UTC et

le rendement des satellites. Les codes de portée et les données sur le système sont transmis au moyen de la technologie d'étalement du spectre numérique biphasé. Le niveau de puissance des signaux du code est de -130 dBm, valeur bien inférieure au bruit de fond thermique.

On prend en considération les codes suivants :

- a) Le code d'acquisition grossière, qui est transmis sur une porteuse à 1 575,42 MHz. Il est modulé par un code de bruit pseudo-aléatoire propre au satellite à un débit des éléments de 1,023 MHz. Cette modulation étale la largeur du spectre d'acquisition grossière à 2 MHz ;
- b) Le code de précision, qui peut être remplacé par un code Y militaire quand le système antibrouillage est actif. Le code de précision et les données sur le système sont transmis de manière cohérente sur les porteuses L1 (1 575 MHz) et L2 (1 228 MHz).

Les longueurs d'onde des signaux GPS sont beaucoup plus courtes que celles des signaux Loran. L'antenne de très petite taille qui capte les signaux GPS doit être placée sur le dessus du corps de la radiosonde et l'horizon doit être dégagé dans toutes les directions. Cette antenne est mieux protégée contre les effets dommageables de l'électricité atmosphérique que les antennes Loran. L'emplacement de l'antenne GPS peut toutefois entrer en conflit avec l'emplacement du capteur de température. Ce dernier doit également être placé sur la partie supérieure du corps de la radiosonde afin d'éviter les problèmes qui peuvent survenir pendant la journée quand l'air circulant au-dessus de la radiosonde est chauffé.

La largeur de bande des codes de portée est trop importante pour que les signaux GPS soient retransmis à la station terrestre de la même manière que les signaux Loran. Il faut prétraiter les signaux GPS au niveau de la radiosonde afin de réduire la quantité d'informations présente dans les signaux à transmettre à la station terrestre, sur la fréquence porteuse de la radiosonde (sous forme de données analogiques, comme dans le cas des systèmes Loran, ou de données numériques). Cette opération peut être réalisée à l'aide de diverses techniques. Les premiers systèmes GPS de radiosonde qui ont été conçus emploient le code d'acquisition grossière dans un mode différentiel. Les signaux sont captés simultanément par un récepteur de la station terrestre et par le récepteur de la radiosonde. Les éphémérides des satellites et les autres informations GPS sont stockées dans le processeur de la station terrestre. Pour effectuer des calculs précis, il faut obtenir les signaux d'au moins quatre satellites. En mode différentiel, le déphasage ou décalage Doppler des signaux reçus par la radiosonde est comparé à ceux captés par la station terres-

tre, ce qui est particulièrement utile quand la radiosonde se trouve à proximité de la station terrestre, car les erreurs de localisation produites par les temps de propagation de l'engin spatial aux récepteurs ou par l'antibrouillage sont semblables dans les deux récepteurs et peuvent être éliminées en grande partie.

Les systèmes de poursuite à l'aide de signaux GPS sont en mesure de fonctionner avec exactitude à une vitesse d'échantillonnage beaucoup plus élevée que celle des systèmes Loran. Il est ainsi possible de mesurer la modulation de la vitesse horizontale apparente car la radiosonde oscille comme un pendule sous le ballon selon une période d'environ 10 s. Les données sur les vents en altitude à une résolution verticale très élevée (50 m) sont rarement nécessaires, sauf dans la couche limite atmosphérique, et il est préférable de filtrer les mouvements d'oscillation avant de transmettre les messages d'observation.

Les premières radiosondes GPS étaient très sensibles au brouillage radioélectrique externe, car leur récepteur était conçu pour les faibles signaux de radio-navigation GPS. Dans les conceptions plus récentes, on a donc optimisé la protection contre ce type de brouillage.

Le principal problème pratique des radiosondes GPS est le temps qu'il faut à leur système de suivi GPS pour se synchroniser avec les signaux reçus du satellite. Il est imprudent de lancer la radiosonde avant que cette synchronisation ait eu lieu. Il faudra peut-être pour cela mettre la radiosonde dehors plusieurs minutes avant son lancement ou mettre au point une méthode de transmission des signaux GPS à la radiosonde à l'endroit où elle est préparée.

13.3 MÉTHODES DE MESURE

13.3.1 Considérations générales sur le traitement des données

Les capteurs de poursuite modernes sont en mesure d'effectuer des mesures à des intervalles beaucoup plus rapprochés que les anciens systèmes manuels, limités pour la plupart à une observation toutes les minutes. En principe, un ordinateur au sol accomplit la totalité du traitement des données sur les vents. L'opérateur archive et vérifie les informations sur un écran d'affichage avant de les transmettre aux utilisateurs.

Il est préférable de relever les données de poursuite à un intervalle de 10 s ou moins. L'échantillonnage doit se faire à la fréquence utile la plus élevée offerte par le système employé. Une cadence soutenue fa-

cilite le contrôle de la qualité avec des algorithmes automatisés. Après l'édition, on peut lisser les données par des techniques statistiques et déterminer, au besoin, la variation de position dans le temps. L'opération de lissage détermine l'épaisseur de la couche atmosphérique à laquelle s'applique la mesure du vent en altitude. Elle est souvent modifiée en cours de vol pour tenir compte des besoins des utilisateurs aux différentes hauteurs et des capacités de poursuite propres au système de mesure du vent. Si l'exactitude est insuffisante aux altitudes supérieures, il peut être nécessaire de ramener la résolution verticale sous la valeur optimale afin de maintenir les erreurs de mesure dans des limites acceptables.

Dans les bons algorithmes d'édition et de lissage, on utilise des polynômes d'ordre faible (Acheson, 1970) ou des fonctions splines cubiques (de Boor, 1978). On trouvera des algorithmes de calcul des vents à partir d'observations par radar et par radiothéodolite dans OMM (1986). Il est en général possible d'établir les paramètres du vent à partir des positions dérivées des données de poursuite ou à partir de la rapidité de changement des variables techniques lissées provenant du système de poursuite (Passi, 1978). On emploie cette dernière technique dans beaucoup de systèmes récents. Il faut, dans ce cas, que les algorithmes puissent gérer certaines singularités dans les variables techniques, par exemple lorsqu'un ballon repasse au-dessus du site de poursuite à une altitude élevée.

Lors de l'affichage, à des fins de vérification, des vents calculés à partir des données de poursuite, il est important d'indiquer sur quelles parties du vol ces données étaient absentes ou inutilisables à cause du bruit. Certains algorithmes servant à l'interpolation risquent de manquer de stabilité en présence de telles discontinuités. Le cisaillement vertical du vent qui repose sur des mesures fiables doit pouvoir être distingué du cisaillement produit artificiellement par le traitement automatisé en l'absence de certaines données. La qualité des observations est souvent médiocre au début de la phase ascensionnelle du ballon. Si le système n'est pas assez fiable peu après le lancement, il est préférable de ne donner la valeur des vents que lorsque les données de poursuite recueillies sont valables. En effet, l'interpolation entre la surface et les premiers niveaux de données valables exige souvent une interpolation à travers des couches de fort cisaillement vertical. Il est rare que les algorithmes automatisés fonctionnent correctement dans ces circonstances.

Selon certains auteurs, on devrait faire appel, dans les systèmes de mesure du vent en altitude, à plusieurs méthodes de poursuite afin d'améliorer l'assurance

qualité des observations. Dans ce cas, une solution optimale des informations de position pourrait être obtenue en appliquant la méthode des moindres carrés au système surdéterminé des équations non linéaires (Lange (1988) et Passi (1978)). Le même type d'analyse pourrait faciliter l'interprétation des données recueillies lorsque plusieurs systèmes poursuivent simultanément le même ballon.

13.3.2 Observations par ballon-pilote

Il est essentiel de mettre parfaitement à niveau et d'orienter précisément le théodolite optique par rapport au nord vrai avant de déterminer l'azimut et le site du ballon dans les airs. L'intervalle de lecture de ces deux angles ne doit pas être inférieur à une minute. Les angles d'azimut sont relevés au dixième de degré près. Lors de l'ascension d'un ballon-pilote, les angles de site de 15° et davantage sont relevés au dixième de degré près. L'exactitude est ramenée à $0,05^\circ$ pour les angles de moins de 15° .

Le suivi de la montée d'une radiosonde au moyen d'un théodolite optique permet d'obtenir une mesure du vent plus précise aux altitudes inférieures. Ainsi, les angles de site sont relevés à $0,1^\circ$ près lorsqu'ils dépassent 20° , à $0,05^\circ$ près lorsqu'ils sont égaux ou inférieurs à 20° mais supérieurs à 15° , et à $0,01^\circ$ près lorsqu'ils mesurent 15° ou moins. L'intervalle de temps peut être mesuré avec un chronomètre ou avec un simple réveil dont la sonnerie se déclenche au moment voulu.

Si l'observation se fait avec un seul théodolite, l'évaluation de la vitesse et de la direction du vent exige le calcul trigonométrique des variations survenues, minute après minute, dans la position du ballon dans le plan. Une calculette convient parfaitement pour cela.

La technique à deux théodolites est recommandée quand on recherche une plus grande exactitude. La ligne de base entre les instruments doit mesurer au moins 2 km de longueur et former, si possible, un angle presque droit avec la direction dominante du vent au moment de l'observation. Les calculs sont plus simples quand les deux sites de poursuite sont au même niveau. La communication par ligne terrestre ou radio devrait aider à synchroniser les observations effectuées à partir des deux emplacements, ce qui est primordial pour obtenir l'exactitude voulue. Les théodolites enregistreurs, qui reportent les lectures par des moyens électroniques, améliorent également l'exactitude des mesures.

Diverses méthodes d'évaluation sont possibles quand on utilise plusieurs théodolites. La redondance des observations permet d'obtenir des don-

nées plus précises, mais les calculs doivent être effectués avec un ordinateur personnel (Lange (1988) et Passi (1978)).

13.3.3 Observations effectuées au moyen d'une antenne directrice

Les systèmes de mesure du vent comportant une antenne directive de poursuite doivent être installés et entretenus avec grand soin. Tout doit être fait pour garantir l'exactitude des mesures de site et d'azimut. Cela suppose une mise à niveau précise de la station et un entretien poussé afin que l'orientation de l'axe électrique de l'antenne reste proche de l'axe mécanique. On peut s'en assurer par plusieurs méthodes, dont le pointage vers des émetteurs locaux ou des cibles de position connue. Ces dernières années, le mauvais alignement de l'azimut a introduit des erreurs supplémentaires dans les mesures du vent effectuées par de nombreuses stations d'observation en altitude.

Il est possible d'étalonner la distance oblique mesurée par un radar primaire quand on dispose de cibles fixes connues. De manière générale, la poursuite peut être vérifiée en comparant les hauteurs géopotentielles déterminées par radar aux observations obtenues simultanément par radiosonde. La correction des erreurs de poursuite introduites dans les mesures de la hauteur par la réfraction atmosphérique est traitée dans la section 13.7.

Jusqu'à une altitude de 24 km environ, le rapprochement des mesures de hauteur radar et des hauteurs géopotentielles de radiosondage permet de déterminer si la poursuite radar est conforme aux normes établies. De plus, quand on sait que les distances obliques mesurées sont fiables, il est possible de découvrir de légères erreurs systématiques dans l'altitude en comparant ces deux hauteurs en fonction de la cotangente de l'altitude. L'OMM (1987) a déterminé les erreurs susceptibles de survenir dans l'évaluation des hauteurs géopotentielles avec les radiosondes les plus courantes.

Les systèmes qui fonctionnent avec un radar ou un radiothéodolite ont parfois du mal à suivre une cible proche. Cela est dû au captage par un des lobes secondaires de l'antenne d'un signal assez fort pour déclencher une poursuite automatique à courte distance. Toutefois, dans ce genre de situation, l'intensité du signal reçu baisse rapidement après quelques minutes et la cible semble perdue. Avec certains systèmes, il peut être difficile de reprendre la poursuite quand des nuages bas, la pluie ou le brouillard sont présents sur le site de lancement. Il faut donc que la cible soit au centre du faisceau principal au début du vol. L'opérateur

peut s'en assurer avec un instrument de visée, une lunette ou une caméra vidéo centré sur l'axe de l'antenne. L'alignement de poursuite est moins facile à contrôler avec un radiothéodolite interférométrique, car la poursuite mécanique ne coïncide pas toujours parfaitement avec la direction empruntée par le ballon.

13.3.4 Observations effectuées au moyen de systèmes de radionavigation

Pour obtenir des mesures valables du vent en altitude à partir de systèmes de radionavigation au sol, la radiosonde doit recevoir des signaux provenant d'au moins trois stations. Le décalage dans les temps d'arrivée des signaux de navigation émis de manière cohérente à partir de deux emplacements et captés par la radiosonde détermine un lieu ou une ligne de position (OMM (1985)). Cette dernière prend la forme d'une hyperbole dans un plan (mais elle se transforme en ellipse sur une surface sphérique). C'est pourquoi les systèmes de navigation qui emploient cette technique sont dits hyperboliques. Il suffit de deux lignes de position qui se coupent pour déterminer les positions dans le plan. Cependant, une forte erreur de mesure peut se produire à la suite d'une faible erreur dans le moment d'arrivée des signaux si les lignes de position sont pratiquement parallèles juste avant leur intersection. Il a été établi clairement que lorsque la mesure du vent repose sur un système de radionavigation, il convient de mettre à profit tous les signaux possibles d'une catégorie donnée (au moins quatre ou cinq en principe) afin d'accroître la fiabilité de la poursuite. Karhunen (1983) a présenté un type d'algorithme permettant d'exploiter tous les signaux existants d'aide à la navigation.

La géométrie pour l'emploi de signaux de navigation est telle que les algorithmes de mesure du vent par GPS semblent donner les résultats les plus fiables lorsque les signaux émanent d'au moins huit satellites en cours d'ascension. On peut faire appel aux éphémérides GPS pour repérer les moments où la géométrie des satellites est faible pour la mesure du vent. Dans la pratique, cela ne se produit pas souvent vu la configuration actuelle des satellites.

Avant le lancement, il convient de synchroniser soigneusement le dispositif de poursuite du système au sol avec les transmissions d'aide à la navigation. On se base généralement pour cela sur les signaux captés par une antenne locale raccordée au récepteur du système terrestre. L'antenne en question doit pouvoir recevoir les signaux nécessaires à la synchronisation dans toutes les conditions météorologiques susceptibles de se produire sur le site.

Le système au sol doit également donner à l'opérateur des indications claires sur les signaux pouvant être captés en vue de procéder à la mesure du vent avant le lancement, mais aussi pendant le vol de la radiosonde.

Les systèmes de mesure du vent à l'aide de signaux de radionavigation fonctionnent de manière largement automatique après le lancement. Toutefois, il est bon que l'opérateur possède une estimation des erreurs de mesure probables en fonction de la configuration et de la qualité des signaux perçus. Pendant le vol, l'opérateur doit être capable de déceler les radiosondes dont les caractéristiques de réception ou d'émission sont mauvaises et qui fournissent des observations de qualité nettement inférieure à la norme. Il faut supprimer ces observations et tenter au besoin un nouveau lancement.

13.4 EXPOSITION DES APPAREILS AU SOL

Le radiothéodolite ou le radar doit être placé sur une hauteur offrant un horizon aussi dégagé que possible. Aucune obstruction importante ne doit sous-tendre un angle de plus de 6° au point d'observation. L'emplacement idéal serait une colline de forme symétrique dont les flancs formeraient une pente d'environ 6° sur une distance de 400 m, située dans une dépression entourée d'autres collines s'élevant à 1 ou 2° de hauteur.

Le dispositif de poursuite doit reposer sur des fondations fermes susceptibles de supporter l'ensemble des appareils. Pour que les mesures obtenues au moyen des systèmes de radionavigation soient utilisables, il faut que les signaux soient convenablement captés par une antenne de radionavigation locale ainsi que par l'antenne du système au sol associée à la radiosonde. Ces appareils doivent donc être installés sur le site d'observation en altitude de manière à bénéficier d'un horizon dégagé permettant la réception de signaux dans toutes les directions.

Les mesures du vent en altitude accompagnent souvent les données sur le vent de surface. Il est recommandé de mesurer le vent de surface à proximité du point de lancement des ballons. Les vents présents sur le site choisi doivent convenir aux mesures en altitude. Si, par exemple, les observations visent à déceler un effet local touchant un aéroport, l'emplacement optimal peut ne pas être celui qui serait retenu pour observer des mouvements sur de plus grandes distances à échelle moyenne ou synoptique.

13.5 SOURCES D'ERREURS

13.5.1 Généralités

Les erreurs survenant dans la mesure du vent en altitude peuvent être dues à une poursuite imparfaite de la trajectoire de la cible dans le plan horizontal, à une mauvaise évaluation de la hauteur de la cible et à des écarts entre le déplacement de la cible et le mouvement réel de l'atmosphère.

13.5.1.1 Erreurs de poursuite

Le rapport entre les erreurs de mesure du vent et les erreurs de poursuite dépend de la méthode d'observation employée. Avec certains systèmes, par exemple les radiothéodolites, les erreurs de mesure varient fortement selon la distance, l'azimut et le site, alors même que les erreurs associées à ces paramètres sont constantes dans le temps. En revanche, les systèmes de poursuite à l'aide de signaux de radionavigation produisent généralement des erreurs relativement stables, quelle que soit la distance ou la hauteur.

L'OMM (1975) a évalué les incertitudes liées au calcul des vents par des méthodes manuelles (tables de traçage, règles à calcul, etc.). Il en est ressorti que ces techniques comportent de très grands risques d'introduire des erreurs importantes et que le calcul des vents en altitude devrait être automatisé dans toute la mesure possible.

L'exactitude des observations effectuées par tous les systèmes de mesure du vent en altitude varie de temps à autre. Ces fluctuations peuvent être passagères et dues à la dégradation des conditions de poursuite ou affecter tout un vol, par exemple quand une radiosonde transmet des signaux erronés. Il peut arriver à certains emplacements que l'exactitude de la poursuite en altitude diminue progressivement sur plusieurs mois, en raison de l'instabilité de la capacité de poursuite ou à cause du mode d'installation au sol. Dans tous les cas, il serait souhaitable que les systèmes de mesure fournissent en temps réel une estimation de l'exactitude des valeurs du vent en altitude. Sachant quelles données sont de piètre qualité, on pourrait leur accorder un moindre poids dans les analyses numériques. Concrètement, les erreurs pourraient être signalées par les codes TEMP ou PILOT voulus et par les tables BUFR (OMM (1995)).

Lorsque les erreurs de poursuite commencent à fausser exagérément la mesure du vent, on y remédie fréquemment en réduisant la résolution verticale. En effet, il est rare que les vents en altitude changent rapidement dans le plan vertical et que de forts écarts apparaissent entre les mesures calculées avec une résolution de 150 m et une résolution de 1,2 km.

La solution consistant à réduire progressivement la résolution verticale dans la haute troposphère et la basse stratosphère a été élaborée au départ pour compenser les limites des radiothéodolites en matière de poursuite. Elle n'est pas justifiée par la structure verticale observée dans l'atmosphère. Une bonne partie des cisaillements vitaux importants surviennent dans la partie supérieure des courants-jets, à des altitudes de 10 à 18 km (voir, par exemple, les profils vitaux présentés en détail par Nash (1994)).

13.5.1.2 Erreurs d'évaluation de la hauteur

Ces erreurs sont généralement faibles, sauf lorsque la hauteur est déduite du temps de vol et de l'évaluation de la vitesse ascensionnelle du ballon.

Néanmoins, des essais menés sur des systèmes de mesure du vent entièrement automatiques ont révélé de fréquents écarts entre les heures affectées aux observations et les heures de mesure par la radiosonde. Dans certains cas, le chronométrage de la mesure du vent n'était pas déclenché au même moment que celui de la radiosonde. Il arrive aussi que divers facteurs entraînent une perte de synchronisation en cours de vol. Dans plusieurs autres systèmes, l'heure attribuée aux vents mesurés correspondait non pas à l'échantillon de données ayant servi à calculer le vent, mais à l'heure du début ou de la fin de l'échantillon. Tout décalage temporel, qui peut produire de fortes erreurs dans les hauteurs attribuées aux mesures du vent, doit être supprimé pour assurer la fiabilité des systèmes opérationnels.

13.5.1.3 Déplacement de la cible et mouvement de l'air

Les systèmes qui offrent la plus grande exactitude en matière de poursuite et la meilleure résolution verticale sont particulièrement sensibles au déplacement de la cible par rapport à l'air. Par exemple, le balancement d'une radiosonde sous un ballon est parfaitement visible dans les mesures de poursuite par GPS. Il convient d'éliminer le plus possible ce genre d'erreur.

Le déplacement par rapport à l'atmosphère, attribuable au décollement de tourbillon dans le sillage du ballon, peut produire des erreurs de 1 à 2 m s⁻¹ (niveau 2σ) pendant la poursuite de petits ballons-pilotes (poids de 50 g) pour une résolution verticale de 50 m. Les erreurs sont moins notables dans les mesures opérationnelles courantes effectuées pour une résolution verticale de 300 m environ avec des ballons plus gros (poids supérieur à 350 g).

Le déportement horizontal des parasondes par rapport à l'atmosphère peut également réduire l'exactitude des mesures GPS. Ces appareils descendant à peu près deux fois plus vite que ne s'élèvent les ballons-sondes opérationnels.

13.5.2 Erreurs dans les observations par ballon-pilote

Les erreurs instrumentales introduites par un bon théodolite optique dépassent rarement $\pm 0,05^\circ$. Elles peuvent varier légèrement en fonction de l'azimut ou du site mais elles restent faibles comparativement aux erreurs attribuables à l'observateur. Les erreurs d'échelle de lecture ne devraient pas dépasser $0,1^\circ$. Elles augmentent avec la distance et aux faibles altitudes.

Dans les observations effectuées avec un seul théodolite, la vitesse variable de montée du ballon est la plus grande source d'erreur. L'incertitude provient du volume de gaz utilisé lors du gonflage, de la forme du ballon et de la vitesse verticale de l'atmosphère traversée. Une erreur donnée dans la vitesse d'ascension entraîne une erreur proportionnelle dans la hauteur du ballon et, de ce fait, une erreur proportionnelle dans la vitesse du vent, compte tenu de l'angle de site.

Quand on utilise deux théodolites, les conséquences des erreurs du système dépendent de la méthode d'évaluation adoptée. Schaeffer et Doswell (1978) ont analysé ce genre d'erreurs.

13.5.3 Erreurs introduites par les systèmes à antenne directive

Le rapport entre les erreurs de vent vectoriel et les erreurs de poursuite en tant que telles peut être approché par une fonction de la hauteur et du vent moyen (ou du rapport de ce dernier à la vitesse moyenne d'ascension du ballon). Les relations concernant les erreurs aléatoires dans les mesures du vent par radiothéodolite et par radar primaire sont les suivantes :

- a) Radar primaire ou secondaire mesurant la distance oblique, l'azimut et le site :

$$\varepsilon_v^2 = 2 \times [\varepsilon_r^2 \times Q^2 / (Q^2 + 1) + \varepsilon\theta^2 \times h^2 + \varepsilon\phi^2 \times h^2 \times Q^2] / t^2 \quad (13.1)$$

- b) Théodolite optique ou radiothéodolite et radiosonde mesurant l'azimut, l'angle de site et la hauteur :

$$\varepsilon_v^2 = 2 \times [\varepsilon h^2 \times Q^2 + \varepsilon_\theta^2 \times h^2 \times (Q^2 + 1)^2 + \varepsilon_\phi^2 \times h^2 \times Q^2] / t^2 \quad (13.2)$$

où ε_v désigne l'erreur de vecteur dans le vent calculé, ε_r l'erreur aléatoire dans la mesure de la distance oblique, ε_θ l'erreur aléatoire dans la mesure de l'angle de site, ε_ϕ l'erreur aléatoire dans la mesure de l'azimut, ε_h l'erreur aléatoire dans la hauteur (dérivée de la mesure de pression), Q l'importance du vent vectoriel moyen jusqu'à la hauteur h divisée par la

vitesse moyenne d'ascension du ballon jusqu'à cette même hauteur et t l'intervalle de temps entre deux échantillons.

Le tableau 13.2 montre les écarts d'exactitude du vent vectoriel obtenu par ces deux méthodes. La vitesse ascensionnelle moyenne employée pour la mesure du vent en altitude se situe généralement entre 5 et 8 m s⁻¹. Les valeurs de l'erreur du vent vectoriel sont données par les équations 13.1 et 13.2 pour diverses hauteurs et valeurs de Q , dans le cas d'un système de poursuite présentant les caractéristiques suivantes : $\varepsilon_r = 20$ m, $\varepsilon_\theta = 0,1^\circ$, $\varepsilon_\phi = 0,1^\circ$, ε_h = l'erreur de hauteur équivalant à une erreur de pression de 1 hPa; $t = 1$ m.

On voit très bien dans le tableau 13.2 qu'un radiothéodolite (ou un théodolite optique) est moins précis pour la mesure des vents qu'un radar primaire ou secondaire pour une exactitude de poursuite donnée.

Dans les équations 13.1 et 13.2, qui définissent l'erreur de vecteur dans les vents calculés, les deux premiers termes entre crochets représentent l'erreur radiale et l'erreur dans les vents observés pour le même azimut que l'antenne de poursuite. Le troisième terme entre crochets correspond à l'erreur tangentielle, soit l'erreur dans les vents observés à angle droit par rapport à l'azimut de l'antenne de poursuite. Avec ce genre de système de mesure du vent en altitude, la distribution des erreurs n'est pas indépendante des directions et ne peut être représentée correctement par un seul paramètre. En conséquence, les valeurs données dans le tableau 13.2 indiquent l'ampleur des erreurs mais non la direction dans laquelle elles agissent.

Si l'importance des erreurs tangentielle et radiale est très différente, la distribution des erreurs est nettement elliptique et les erreurs conjuguées tendent à se concentrer parallèlement ou perpendiculairement à l'axe de l'antenne de poursuite. Le tableau 13.3 présente le rapport de certaines erreurs tangentielles et radiales qui, combinées, donnent les erreurs de vecteur qui apparaissent dans le tableau 13.2. Quand le rapport est supérieur à 3, l'erreur tangentielle est dominante. On peut en déduire que, dans les mesures par radar, les erreurs tangentielles dominent quand les distances sont importantes (vents moyens forts, donc valeurs Q élevées, plus hauteurs maximales). Au contraire, dans les mesures par radiothéodolite, les erreurs radiales dominent pour de grandes distances et les rapports sont nettement inférieurs à 1. Ce sont les erreurs d'angle de site qui contribuent le plus aux erreurs radiales. Cependant, les erreurs aléatoires dans la hauteur de la radiosonde sont plus déterminantes à grande altitude quand les valeurs de Q sont faibles.

Tableau 13.2. Erreur vectorielle de 90 pour cent ($m s^{-1}$) en fonction de la hauteur et rapport Q du vent moyen et de la vitesse ascensionnelle

Q	Radar						Radiothéodolite					
	ε_v 5 km	ε_v 10 km	ε_v 15 km	ε_v 20 km	ε_v 25 km	ε_v 30 km	ε_v 5 km	ε_v 10 km	ε_v 15 km	ε_v 20 km	ε_v 25 km	ε_v 30 km
1	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5	1	1,5	3	5,5	9	25
2	1	1,5	2,5	3	4	4	5	4	6,5	11	19	49
3	1,5	2,5	3	4	5	6	4	7	11	19	30	76
5	1,5	3	5	6	2,5	10	9	18	27	42	59	131
7	2,5	5	7	9	11	13	18	34	51	72	100	194
10	3	6,5	10	13	16	19	34	67	100	139	182	310

• Notes : Ce tableau ne contient pas les erreurs sur les observations par radiothéodolite dues aux brouillages dans la propagation par trajets multiples. Ces effets peuvent entraîner des erreurs supplémentaires pour les valeurs de Q allant de 7 à 10.

En pratique, les observations du vent par radiothéodolite sont lissées sur des couches plus épaisses que ne l'indiquent ces calculs à toutes les hauteurs sauf à 5 km. Par conséquent, à 15 km de hauteur ou au-delà, les erreurs sur les observations par radiothéodolite devraient être divisées par au moins un facteur 4 pour correspondre à la pratique.

Tableau 13.3. Rapport des composantes de l'erreur d'observation du vent en altitude
(α_{ε_v} = erreur tangentielle/erreur radiale α)

Q	Radar						Radiothéodolite					
	α_{ε_v} 5 km	α_{ε_v} 10 km	α_{ε_v} 15 km	α_{ε_v} 20 km	α_{ε_v} 25 km	α_{ε_v} 30 km	α_{ε_v} 5 km	α_{ε_v} 10 km	α_{ε_v} 15 km	α_{ε_v} 20 km	α_{ε_v} 25 km	α_{ε_v} 30 km
1	1/2	1	1	1	1	1	1/3	1/2	1/3	1/4	1/5	1/13
2	1	1	2	2	2	2	1/3	1/3	1/3	1/4	1/6	1/13
3	1	2	2	3	3	3	1/4	1/4	1/4	1/5	1/6	1/13
5	1	3	4	4	5	5	1/5	1/5	1/6	1/6	1/7	1/14
7	3	5	5	6	6	7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/9	1/14
10	4	7	8	9	9	9	1/10	1/10	1/10	1/11	1/11	1/16

Les résultats présentés dans les tableaux 13.2 et 13.3 reposent sur une évaluation théorique des erreurs introduites par les différents types de systèmes. On suppose néanmoins que les vents sont calculés à partir d'un simple écart entre deux échantillons discrets de données de poursuite. Les calculs ne tiennent pas compte de l'amélioration de l'exactitude des mesures qui est possible quand les vitesses de changement de position sont déduites de grands échantillons d'informations recueillis pour une résolution temporelle élevée. Le tableau 13.4 renferme les estimations de l'exactitude réelle des mesures atteinte par divers radars

et radiothéodolites au cours des quatre phases de la comparaison internationale de radiosondes organisée par l'OMM (voir les exactitudes données dans la section 13.6.1.2).

Trois radiothéodolites ont été testés lors de cette comparaison. C'est le système japonais qui a le mieux géré les situations à haute valeur de Q, mais les altitudes ont été fortement lissées et les mesures du vent vertical manquaient d'exactitude dans les couches supérieures des courants-jets. Le petit radiothéodolite portatif installé au Japon par les États-Unis d'Amérique a introduit les plus fortes erreurs

Tableau 13.4. Évaluations d'erreurs vectorielles aléatoires types (niveau 2σ , unité m s^{-1}) sur les mesures de vent en altitude obtenues lors de la Comparaison internationale de radiosondes de l'OMM (y compris les évaluations des valeurs types de Q et α_{ε_v} pour chacune des quatre phases)

Système	ε_v 3 km	α_{ε_v} 3 km	Q 3 km	ε_v 18 km	α_{ε_v} 18 km	Q 18 km	ε_v 28 km	α_{ε_v} 28 km	Q 28 km	Lieu
Radar primaire (Royaume-Uni)	1,1	1	3,5	2,1	1,3	5	2,7	1,6	5	Royaume-Uni ^a
Radiothéodolite (États-Unis)	2,1	≈ 1	1,5	4,8	≈ 1	2,5	5,2	≈ 1	1	Royaume-Uni
Radiothéodolite (États-Unis)	2,8	≈ 1	2,5	10,4	0,4	6	9	0,33	4	États-Unis
Radiothéodolite, portable	1,5	≈ 1	< 1	4,8	≈ 1	3	5,8	≈ 1	1,5	Kazakhstan
Radiothéodolite, portable	2,2	≈ 1	1,5	12	0,31	5,5	9	0,23	4	Japon
Radiothéodolite (Japon)	1,7	≈ 1	1,5	6,4	0,48	5,5	4,7	0,48	4	Japon
Radar secondaire (AVK, Fédération de Russie)	1,5	≈ 1	< 1	2,6	≈ 1	3	2,6	≈ 1	1,5	Kazakhstan
Radar secondaire (Chine)	1,5	≈ 1	< 1	3,8	≈ 1	3	3,4	≈ 1	1,5	Kazakhstan

(a) Données obtenues au Royaume-Uni après la phase I de la Comparaison internationale de radiosondes de l'OMM (voir Edge et al., 1986).

de vent pour des valeurs Q élevées, en raison de problèmes de brouillage dus à la propagation par trajets multiples.

La forme elliptique de la distribution des erreurs dans les observations effectuées par radar et par radiothéodolite présentait les tendances prévues pour de hautes valeurs de Q . Toutefois, l'ellipticité n'était pas aussi accentuée que dans le tableau 13.3, sans doute parce que les erreurs aléatoires dans la vitesse de changement de l'azimut et du site étaient, en réalité, plus faibles que celles définies pour construire ce tableau.

13.5.4 Erreurs associées aux systèmes de radionavigation au sol

Les erreurs dépendent dans ce cas de la stabilité de phase des signaux de radionavigation captés par la radiosonde et de la position de cette dernière par rapport aux émetteurs du réseau. Il ne faut pas non plus ignorer la qualité de la liaison télémétrique entre la radiosonde et le récepteur au sol. Il a été établi, lors d'essais sur l'éloignement des radiosondes (au moins 50 à 100 km), que les erreurs dans les mesures du vent obtenues à l'aide de signaux de radionavigation augmentent pour de grandes distances,

mais généralement à un rythme comparable ou inférieur au rythme observé avec l'accroissement de la distance d'un radar primaire. La réception du signal provenant de la radiosonde immédiatement après le lancement n'est pas toujours fiable. Les vents mesurés par le système Loran-C comportent davantage d'erreurs à ce moment-là qu'après plusieurs minutes de vol, quand la trajectoire de la radiosonde s'est stabilisée.

Dans les systèmes de radionavigation, l'exactitude des mesures du vent est principalement limitée par le rapport signal/bruit à la réception par la radiosonde. Les temps d'intégration employés pour obtenir des mesures fiables varient de 30 s à 2 min avec les signaux Loran-C; ils sont inférieurs à une minute avec le GPS. L'intensité des signaux provenant d'un émetteur Loran-C peut fluctuer notablement au cours d'une journée. En effet, les variations diurnes qui surviennent dans la hauteur et l'orientation des couches ionosphériques ont, dans certaines circonstances, un effet majeur sur la force du signal. Les écarts observés dans l'intensité et la stabilité des signaux sont parfois tels qu'il est impossible, avec le système Loran-C, d'obtenir de bonnes mesures du vent à toutes les heures de la journée.

Un autre facteur déterminant pour l'exactitude des mesures est la diminution de l'exactitude d'origine géométrique, laquelle dépend de la position du récepteur de la radiosonde par rapport aux émetteurs des signaux de radionavigation. Lorsque la radiosonde se trouve près du milieu de la ligne de base reliant deux émetteurs, une erreur aléatoire donnée dans le décalage temporel des signaux entraîne une faible erreur aléatoire de position, dans une direction parallèle à la ligne de base. En revanche, la même erreur aléatoire de décalage produit une erreur de position très importante dans la même direction si la radiosonde se trouve dans le prolongement de la ligne de base, au-delà de l'un ou l'autre des émetteurs. Pour obtenir des mesures bidimensionnelles du vent horizontal les plus exactes possibles, il faut disposer d'au moins deux paires d'émetteurs de radionavigation dont les lignes de base sont à peu près perpendiculaires, la radiosonde étant située vers le centre du triangle formé par trois des émetteurs. Quand les conditions réelles de fonctionnement le permettent, on capte les signaux provenant de plus de deux paires d'émetteurs afin d'accroître l'exactitude des observations. Les techniques d'évaluation de la cohérence des données obtenues au moyen de la méthode des moindres carrés sont utiles pour évaluer l'ampleur des erreurs de mesure du vent.

Les perturbations dans la propagation des signaux émis par le réseau de radionavigation constituent une autre source d'erreur.

13.5.4.1 Mesure du vent par le système Loran-C

Les systèmes vendus dans le commerce fournissent des données de bonne qualité, comme on le voit dans le tableau 13.5. La qualité obtenue quand on utilise essentiellement des signaux propagés par ondes de sol a été dérivée d'essais d'installation menés dans les îles britanniques (voir Nash et Oakley (1992)). La qualité atteinte avec des émetteurs à grande distance, où les ondes ionosphériques sont importantes, a été évaluée à partir des résultats de la phase IV de la comparaison internationale OMM de radiosondes organisée au Japon (voir OMM (1996)).

13.5.5 Erreurs associées au système de positionnement global (GPS)

En théorie, les systèmes de mesure du vent par GPS qui utilisent les codes d'acquisition grossière en mode différentiel sont susceptibles de mesurer les vents avec une exactitude de $0,2 \text{ m s}^{-1}$. Les estimations présentées dans le tableau 13.5 proviennent d'essais récents de radiosondes GPS conduits par l'OMM. La principale différence entre ces systèmes vient du filtrage appliqué au vent pour supprimer le mouvement de pendule de la radiosonde. À long terme, les mesures du vent par GPS sont au moins aussi fiables que les meilleures mesures effectuées par des radars primaires.

13.6 COMPARAISON, ÉTALONNAGE ET ENTRETIEN

13.6.1 Comparaison

Les systèmes de mesure du vent en altitude sont des appareils assez complexes qui peuvent présenter divers modes de défaillance. Il n'est pas rare qu'un système continue à produire une structure verticale du vent plausible alors qu'une de ses parties est en panne. Beaucoup ont besoin d'être soigneusement alignés et entretenus pour préserver l'exactitude de la poursuite.

Il est possible de vérifier l'exactitude des mesures du vent en consultant les statistiques de surveillance des observations émises par les centres de prévision numérique du temps. Ces statistiques présentent les écarts entre les mesures du vent en altitude réalisées sur chaque site et les champs de prévision (de fond) à courte échéance pour les mêmes emplacements. Avec les techniques modernes d'analyse et d'assimilation des données, les erreurs d'observation influent dans une certaine mesure sur les champs d'analyse météorologique. Il a été démontré que l'on peut déceler ces erreurs de manière très fiable

Tableau 13.5. Erreur aléatoire (niveau 2σ) et biais systématiques escomptés des systèmes Navaid de détection des vents dans les zones où la couverture par les signaux Navaid est quasi optimale

Système	Temps moyen (s)	Biais systématique (m s^{-1})	Erreur aléatoire (m s^{-1})
Loran-C (onde de sol)	30 - 60	jusqu'à $\pm 0,2$	0,6 - 3
Loran-C (onde ionosphérique)	60 - 120	jusqu'à $\pm 0,2$	1,6 - 4
GPS	5	jusqu'à $\pm 0,1$	0,2 - 0,6

au moyen d'une prévision à courte échéance tirée d'une analyse effectuée six heures avant le moment de l'observation.

Les systèmes de mesure du vent peuvent aussi être comparés à d'autres systèmes dont on connaît la qualité des mesures. Il faut pour cela organiser des essais spéciaux qui permettent d'évaluer les erreurs de poursuite indépendamment des erreurs d'évaluation de la hauteur.

L'interprétation des résultats des deux types de comparaisons peut se faire au moyen des méthodes statistiques suggérées dans OMM (1989).

13.6.1.1 Surveillance opérationnelle par comparaison avec les champs de prévision

Les opérateurs peuvent obtenir auprès des principaux centres désignés par la Commission des systèmes de base de l'OMM les statistiques nécessaires pour comparer les mesures opérationnelles du vent et les champs de prévision à courte échéance des modèles de prévision numérique du temps.

Les statistiques de surveillance ne sont pas faciles à interpréter quand elles concernent les vents en altitude. L'ampleur des erreurs aléatoires dans les champs de prévision est comparable ou supérieure aux erreurs attribuables aux systèmes de mesure, quand ces derniers fonctionnent correctement. Les erreurs de prévision varient selon la situation géographique et il est parfois nécessaire de faire appel au centre de prévision numérique du temps pour être guidé dans leur interprétation. Néanmoins, il est relativement simple de déceler les systèmes de mesure du vent en altitude qui introduisent des erreurs aléatoires nettement plus élevées que la moyenne. Ces dernières années, environ 6 % des systèmes exploités dans le réseau mondial ont été jugés défectueux. Il s'agissait en majorité de radiothéodolites et de radars secondaires.

Les sommaires des écarts entre les observations et les champs de prévision établis sur plusieurs mois ou sur une année complète sont également utiles pour déterminer les erreurs systématiques dans la vitesse et la direction du vent propres à un système donné. Un léger défaut d'alignement des antennes de poursuite des radiothéodolites ou des radars est relativement fréquent.

13.6.1.2 Comparaison avec d'autres systèmes de mesure du vent

Des essais spéciaux ont donné une foule d'informations sur les performances réelles des divers systèmes de mesure du vent en altitude utilisés dans le monde. Au cours de ce genre de comparaisons,

plusieurs cibles suspendues à un même ballon sont suivies simultanément par différents systèmes au sol. L'heure des messages d'observation de vent émis par les stations au sol est synchronisée à moins d'une seconde près. Il est ainsi possible de comparer les mesures du vent en fonction de l'heure en vol et de comparer indépendamment les hauteurs attribuées au vent. L'interprétation des résultats est plus fiable si un système au moins fournit des mesures de grande exactitude, avec des caractéristiques d'erreur bien établies.

Une série complète d'essais a été effectuée entre 1984 et 1993 dans le cadre de la comparaison internationale OMM de radiosondes. La phase I s'est déroulée au Royaume-Uni et la phase II aux États-Unis (OMM (1987)). La phase III a été réalisée par la Russie dans la République du Kazakhstan (OMM (1991)) et la phase IV au Japon (OMM (1996)).

Les renseignements qui apparaissent dans les tableaux 13.4 et 13.5 reposent essentiellement sur les résultats de cette comparaison et sur d'autres essais conduits avec le même étalon.

Il est à espérer que lorsque leur mise en place sera terminée, les systèmes de mesure du vent au moyen du GPS constitueront de bons étalons mobiles pour comparer les mesures du vent en altitude dans des régions reculées de la planète.

13.6.2 Étalonnage

Sur les radars, on vérifie l'étalonnage de la distance oblique en utilisant les retours de signal provenant d'un objet éloigné dont on connaît précisément la position. Il convient de vérifier l'azimut de la même façon.

L'orientation des antennes de poursuite des radiothéodolites ou des radars doit être vérifiée régulièrement en comparant les lectures obtenues pour les valeurs indiquées par un théodolite optique. Si l'écart moyen entre les lectures du site fournies par le théodolite et par le radar excède $0,1^\circ$, il faut contrôler l'ajustement de l'antenne. Lors de la vérification de l'azimut avec un compas, la conversion du nord géomagnétique en nord géographique exige une grande exactitude.

Quand on utilise un système de radionavigation, il est important de s'assurer que l'emplacement des installations au sol est convenablement enregistré dans l'ordinateur. Le système de poursuite doit être configuré correctement, selon les instructions du fabricant, et doit présenter un fonctionnement stable avant le lancement des radiosondes.

13.6.3 Entretien

Les radiothéodolites et les radars sont des appareils assez complexes dont on confie généralement l'entretien à un technicien expérimenté. Ce dernier est chargé de l'entretien électrique et mécanique ainsi que des réparations. Le degré de compétence du personnel et la fréquence de l'entretien dépendent de la conception du système. Certains radiothéodolites récents présentent une fiabilité mécanique plus grande que les anciens modèles. Il est important de considérer les frais et la faisabilité de l'entretien lors du choix d'un système de mesure du vent en altitude.

Dans la plupart des systèmes modernes de poursuite à l'aide de signaux de radionavigation, on élimine les défaillances électriques en remplaçant les modules concernés. Cela peut comprendre, par exemple, les récepteurs des radiosondes ou les systèmes de poursuite. En principe, le système au sol ne contient pas de pièces mobiles, ce qui réduit considérablement l'entretien mécanique, bien qu'il faille inspecter régulièrement les antennes, les câbles et les connecteurs à la recherche de corrosion et d'effets de l'érosion. Les frais d'entretien sont donc minimes si l'on a acheté suffisamment de modules de rechange avec le système.

13.7 CORRECTIONS

Lorsque les observations de radiovent sont effectuées à l'aide d'un système radar, les données de poursuite servent à calculer les hauteurs attribuées aux mesu-

res du vent. Il convient de corriger ces hauteurs pour tenir compte de la courbure de la Terre par l'équation suivante :

$$\Delta z_{\text{courbure}} = 0,5 (r_s \times \cos\theta)^2 / (R_c + r_s \sin\theta) \quad (13.3)$$

où r_s désigne la distance oblique de la cible, θ l'angle de site de la cible et R_c le rayon de courbure de la Terre au niveau de la station terrestre.

De plus, la direction de propagation du faisceau radar n'est pas constante, car l'indice de réfraction de l'air diminue en moyenne avec la hauteur, tout comme la température et la vapeur d'eau. La baisse de l'indice de réfraction provoque le fléchissement de l'onde radar vers la Terre. Par conséquent, l'angle de site observé tend généralement à surestimer la hauteur géométrique vraie de la cible.

Le tableau 13.6 donne l'ordre de grandeur des facteurs de correction $\Delta z_{\text{réfraction}}$ calculés par Hooper (1986). Grâce à l'augmentation récente de la puissance de traitement des ordinateurs associés aux systèmes au sol, il est plus facile d'utiliser des algorithmes qui calculent ces corrections pour les radars de poursuite de grande précision. Les valeurs présentées dans le tableau 13.6 ont été obtenues à partir des moyennes climatologiques de température et de vapeur d'eau établies sur cinq ans à divers emplacements. Les journées où l'indice de réfraction est particulièrement élevé, il peut être nécessaire à certains endroits d'augmenter le facteur de correction de 30 % par rapport aux moyennes climatologiques.

Tableau 13.6. Exemples de correction pour la courbure de la Terre et la réfraction à appliquer aux hauteurs observées par radar

Distance horizontale (km)	Altitude (km)	$\Delta z_{\text{courbure}}$	$\Delta z_{\text{réfraction}}$ 60°N 01°W	$\Delta z_{\text{réfraction}}$ 36°N 14°E	$\Delta z_{\text{réfraction}}$ 1°S 73°E
25	10	49	- 9	- 10	- 12
50	15	196	- 31	- 34	- 39
100	20	783	- 106	- 117	- 133
150	25	1 760	- 211	- 231	- 262
200	30	3 126	- 334	- 363	- 427

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Brousaides, F.J. et J.F. Morrissey, 1974 : Residual temperature-induced humidity errors in the National Weather Service radiosonde. *Rapport final AF-CRL-TR-74-0111*, Instrument Paper N° 215.
- Cole, H. L. et E. Miller, 1995 : A correction for low-level radiosonde temperature and relative humidity Measurements. *Neuvième symposium de l'AMS sur les observations et les instruments météorologiques*, Charlotte, Caroline du Nord, p. 32-36.
- De Boor, C., 1978 : *A Practical Guide to Splines*. Springer Verlag, New York.
- Edge, P., M. Kitchen, J. Harding et J. Stancombe, 1986 : *The Reproducibility of RS3 Radiosonde and Coscor WF Mk IV Radar Measurements*. Meteorological Office, Bracknell, OSM 35.
- Elms, J.B. et J. Nash, 1996 : Personal communication of results from a comparison of pre-production GPS radiosonde wind measurements with Loran-C and radar winds. Camborne, Royaume-Uni, 5-19 janvier 1996.
- Garand, L., C. Grassotti, J. Hallé et G.L. Klein, 1992 : On differences in radiosonde humidity-reporting practices and their implications for numerical weather prediction and remote sensing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 73, p. 1417-1423.
- Hooper, A.H., 1986 : *The Calculation of Radio-wave Refraction, with Special Reference to Data from Height-finding Radars*. Meteorological Office, Bracknell, OSM 17.
- Kaisti, K., 1995 : New low-cost GPS solution for upper-air windfinding. *Compte rendu du neuvième Symposium sur les observations et les instruments météorologiques*, Charlotte, Caroline du Nord (27-31 mars 1995), American Meteorological Society, p. 16-20.
- Karhunen, P., 1983 : Automated windfinding developments. Texte préliminaire du cinquième Symposium de l'AMS sur les observations et les instruments météorologiques (Toronto, 11-15 avril 1983), p. 110-115.
- Kursinski, E.R., G.A. Hajj, J.T. Schofield, R.P. Linfield et K.R. Hardy, 1997 : Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, Volume 102, p. 23429-23466.
- Lange, A.A., 1988 : *A high-pass filter for optimum calibration of observing systems with applications*. In: *Simulation and Optimization of Large Systems* (sous la direction de A.J. Osiadacz). Clarendon Press, Oxford, p. 311-327.
- Leiterer, U., H. Dier, D. Nagel, T. Naebert, D. Althausen, K. Franke, A. Kats et F. Wagner, 2005 : Correction method for RS80-A Humicap humidity profiles and their validation by Lidar backscattering profiles in tropical cirrus clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 22, p. 18-29.
- McIlveen, J.F.R. et F.H. Ludlam, 1969 : The lag of the humidity sensor in the British radiosonde. *Meteorological Magazine*, Volume 98, p. 233-246.
- Miloshevich, L.M. A. Paukkunen, H. Vomel et S.J. Oltmans, 2004 : Development and validation of a time-lag correction for Vaisala radiosonde humidity measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 21, p. 1305-1327.
- Miloshevich, L.M., H. Vömel, A. Paukkunen, A.J. Heymsfield et S.J. Oltmans, 2001 : Characterization and correction of relative humidity measurements from Vaisala RS80-A radiosondes at cold temperatures. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 18, p. 135-156.
- Nash, J., 1984 : *Compatibility of Radiosonde Measurements in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere for the Period 1 November 1981 to 31 October 1982*. Meteorological Office, Bracknell, O.S.M. No. 24.
- Nash, J. et T. J. Oakley, 1992 : Experience in the use of Loran-C windfinding in the United Kingdom. *Compte rendu du vingt et unième Symposium technique annuel*, Wild Goose Association, Birmingham, Angleterre, p. 81-88.
- Nash, J., 1994 : Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Annales Geophysicae*, Volume 12, p. 691-710.
- Nash, J., J.B. Elms et T.J. Oakley, 1995 : *Relative humidity sensor performance observed in recent international radiosonde comparisons*. *Neuvième Symposium de l'AMS sur les observations et les instruments météorologiques*, Charlotte, Caroline du Nord, p. 43-48.
- Organisation météorologique mondiale, 1970 : *Performance Requirements of Aerological Instruments* (C.L. Hawson). Note technique N° 112, WMO-No. 267.TP.151, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1975 : *Upper-Air Sounding Studies. Volume I: Studies on Radiosonde Performance* (A.H. Hooper), Note technique N° 140, WMO-No. 394, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1975 : *Upper-Air Sounding Studies. Volume II: Manual Computation of Radiowinds* (R.E. Vockeroth). Note technique N° 140, WMO-No. 394, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1985 : *Meteorological Observations Using Navaid Methods*

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

(A.A. Lange). Note technique N°185, WMO-No. 641, Genève.

- Organisation météorologique mondiale, 1986 : *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Rapport N° 21 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 175, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1987 : *Comparaison internationale de radiosondes de l'OMM* (Royaume-Uni: 1984, États-Unis: 1985): *Rapport final* (J. Nash et F.J. Schmidlin). Rapport N° 30 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 195, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : *Values of some physical functions and constants used in meteorology. Règlement technique*, Volume I, Appendice A, OMM-N° 49, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989 : An algorithmic approach for improving and controlling the quality of upper-air data (A.A. Lange). *Documents présentés lors de la quatrième Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECIMO-IV)* (Bruxelles, 4-8 septembre 1989). Rapport N° 30 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 303, Genève, p. 87-92.
- Organisation météorologique mondiale, 1989a : SRS-400: The new Swiss radiosonde (B. Hoegger, A. Heimo, G. Levrat et J. Rieker). *Documents présentés lors de la quatrième Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECIMO-IV)* (Bruxelles), Rapport N° 35 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 303, Genève, p. 197-202.
- Organisation météorologique mondiale, 1989b : *Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements* (M. Kitchen). Rapport N° 36 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 344, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1991 : *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (URSS), 1989: Rapport final* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash et N. Zaitseva). Rapport N° 40 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 451, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Vocabulaire météorologique international*. Deuxième édition, OMM-N° 182, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993a : *Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices* (D.J. Gaffen). Rapport N° 50 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 541, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993b : *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring*. Part A: WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1993), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1990, 1991 and 1992 (T. Oakley), Rapport N° 56 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 587, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1994 : A new GPS rawinsonde system (D.B. Call). *Documents présentés lors de la Conférence technique sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-94)* (Genève, 28 février – 2 mars 1994), Rapport N° 57 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 588, Genève, p. 159-163.
- Organisation météorologique mondiale, 1994a : The difference in observed temperatures from radiosondes suspended 10 m and 40 m beneath a 1400 g balloon (J.B. Elms, J. Nash et G. Williams). *Documents présentés lors de la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECIMO-IV)*, Rapport N° 57 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 588, Genève, p. 121-126.
- Organisation météorologique mondiale, 1994b : Comparison of potential reference radiosonde observations – Résultats de PREFRS-92 (J. Nash). *Documents présentés lors de la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-94)*, Rapport N° 57 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 588, Genève, p. 115-120.
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel des codes*. Volume I.1, OMM-N° 306, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1996a : *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV: Final Report* (S. Yagi, A. Mita et N. Inoue). Rapport N° 59 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 742, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1996b : *Description and User Guide for the Radiosonde Comparison and Evaluation Software Package (RSKOMP – Version 3/Version 4)* (S. Kurnosenko et T. Oakley). Rapport N° 60 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 771, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998 : *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring*. Part A : WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1998), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1995, 1996 and 1997 (T. Oakley), Rapport N° 72 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 886, Genève.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Organisation météorologique mondiale, 2003a : *Manuel du Système mondial d'observation*. Volume I, OMM-N° 544, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003b : *WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members in 2002 and Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements for Period from 1998 to 2001* (J. Elms). Rapport N° 80 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 1197, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003c : *Executive Summary of the WMO Intercomparison of GPS Radiosondes* (Alcantara, Maranhao, Brésil, 20 mai – 10 juin 2001). Rapport N° 76 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 1153, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2005a : Preliminary results of WMO intercomparison of high quality radiosonde systems, Maurice, février 2005 (B. Pathack, J. Nash, R. Smout et S. Kurnosenko). *Documents présentés lors de la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2005)*, Rapport N° 80 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 1265, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2005b : Results of the RS92 acceptance test performed by the Met Office (UK) (R. Smout, J. Nash, T. Hewison et M. Smees). *Documents présentés lors de la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux (TECO-2005)*, Rapport N° 82 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 1265, Genève. Acheson, D.T., 1970: *Loran-C Windfinding Capabilities: Wallops Island Experiments*. United States Department of Commerce, Weather Bureau, ESSA Technical Memorandum WBTM EDL 11.
- Passi, R.M., 1978 : Overdetermined windfinding systems. *Atmospheric Technology*, N° 10, Hiver 1978-1979, p. 65-75.
- Passi, R.M. et C. Morel, 1987 : Wind errors using the worldwide Loran network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 4, p. 690-700.
- Paukkunen, A., 1995 : *Sensor heating to enhance reliability of radiosonde humidity measurement*. Neuvième Symposium de l'AMS sur les observations et les instruments météorologiques, Charlotte, Caroline du Nord, p. 65-69.
- Richner, H., J. Joss et P. Ruppert, 1996 : A water hydrometer utilizing high-precision thermocouples. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 13, p. 175-182.
- Schaefer, J.T. et C.A. Doswell, 1978 : The inherent position errors in double-theodolite pibal measurements. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 17, p. 911-915.
- Schmidlin, F.J., H. Sang Lee et B. Ranganayakamma, 1995 : *Deriving the accuracy of different radiosonde types using the three-thermistor radiosonde technique*. Neuvième Symposium de l'AMS sur les observations et les instruments météorologiques, Charlotte, Caroline du Nord, p. 27-31.
- Stickland, J.J., 1996 : Communication personnelle sur les résultats d'essais de radiosondes GPS. Service météorologique australien.
- Turner, D.D., B.M. Lesht, S.A. Clough, J.C. Liljegren, H.E. Revercomb et D.C. Tobon, 2003 : Dry bias and variability in Vaisala RS80-H radiosondes: The ARM experience. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 20, p. 117-132.
- Turtiainen, H., S. Tammela et I. Stuns, 1995 : *A new radiosonde temperature sensor with fast response time and small radiation error*. Neuvième Symposium de l'AMS sur les observations et les instruments météorologiques, Charlotte, Caroline du Nord, p. 60-64.
- Wade, C.G., 1994 : An evaluation of problems affecting the measurement of low relative humidity on the United States radiosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 11, p. 687-700.
- Wade, C.G., 1995 : *Calibration and data reduction problems affecting national weather service radiosonde humidity measurements*. Neuvième Symposium de l'AMS sur les observations et les instruments météorologiques, Charlotte, Caroline du Nord, p. 37-42.
- Wang, J., H.L. Cole, D.J. Carlson, E.R. Miller, K. Beierle, A. Paukkunen et T.K. Laine, 2002 : Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80 radiosonde: Application to TOGA-COARE data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 19, p. 981-1002.

CHAPITRE 14

OBSERVATION DU TEMPS PRÉSENT ET PASSÉ ET DE L'ÉTAT DU SOL

14.1 GÉNÉRALITÉS

14.1.1 Définitions

Dans la pratique de l'observation, on considère que le terme « temps » englobe les observations de l'état de l'atmosphère et des phénomènes qui lui sont associés, que l'on n'entendait pas, initialement, mesurer quantitativement. Ces observations sont des descriptions qualitatives de phénomènes observés dans l'atmosphère ou à la surface terrestre, comme les précipitations (hydrométéores en chute dans l'atmosphère), les particules en suspension ou soulevées par le vent (hydrométéores et lithométéores) ou d'autres phénomènes optiques spécialement désignés (photométéores) ou des phénomènes électriques (électrométéores). Une description détaillée de ces phénomènes est donnée dans l'Atlas international des nuages (OMM-N° 407).

- Un *hydrométéore* consiste en un ensemble de particules d'eau, liquide ou solide, en chute ou en suspension dans l'atmosphère, ou soulevées de la surface du globe par le vent ou encore déposées sur des objets au sol ou dans l'atmosphère libre.
- Un *lithométéore* consiste en un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses. Les particules sont plus ou moins en suspension dans l'atmosphère, ou soulevées du sol par le vent.
- Un *photométéore* est un phénomène lumineux engendré par réflexion, réfraction, diffraction ou interférences de la lumière solaire ou lunaire.
- Un *électrométéore* est une manifestation visible ou audible de l'électricité atmosphérique.

Les phénomènes météorologiques localisés, dont on peut trouver les définitions dans la publication OMM-N° 182, constituent une classe à part. Certains phénomènes particuliers, notamment les tourbillons de poussière et les tubas, sont définis et décrits dans la section 14.2.3.

Dans les observations météorologiques, le temps est signalé sous deux formes. Le temps présent est une description des phénomènes météorologiques qui se manifestent au moment de l'observation. Le temps passé sert à décrire les phénomènes météorologiques importants qui se sont produits pendant l'heure qui précède l'observation, mais qui ont cessé au moment de l'observation.

Le présent chapitre décrit aussi les méthodes d'observation d'un élément connexe, à savoir l'état du sol, c'est-à-dire celui de la surface terrestre résultant des phénomènes climatiques et météorologiques récents, que l'on signale sous la forme d'une quantité d'humidité ou de la description de toute couche de particules solides, aqueuses ou non, couvrant la surface normale.

14.1.2 Unités et échelles

Les observations, réalisées aux stations dotées de personnel, dites du temps présent, du temps passé et de l'état du sol sont accompagnées de données quantitatives. Ces observations ont été normalisées suivant des échelles qui permettent à l'observateur de choisir un terme approprié parmi un grand nombre de descriptions établies en fonction des éléments perçus par les observateurs humains et décrites dans le Manuel des codes (OMM-N° 306).

Depuis 1990, l'entrée en service de stations météorologiques automatiques a fait naître le besoin de quantifier les fonctions assurées jusque-là par des observateurs. Pour tenir compte des degrés de perfectionnement et d'efficacité variables des stations météorologiques automatiques dans l'observation du temps présent et passé, on a ajouté au Manuel des codes (OMM-N° 306) des directives de codage particulières. Les données portant sur le temps présent et sur le temps passé, relevées par des systèmes perfectionnés de mesure du temps, étant particulièrement complexes, il convient de les transmettre sous la forme de grandeurs en code binaire étant donné que le code alphanumérique impose de nombreuses contraintes dans le détail de la constitution des messages¹.

14.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Les observations du temps présent et passé, de même que de l'état du sol servent essentiellement à décrire qualitativement des phénomènes météorologiques. Elles sont surtout nécessaires du fait de l'influence des phénomènes sur les activités humaines et la sé-

¹ La recommandation 3 (CBS-XII) fait état de la nécessité « de transmettre des données quantitatives par opposition à des paramètres qualitatifs dans les observations du temps présent exécutées par les stations automatiques et ce dans les codes FM 94 BUFR et FM 95 CREX ».

curité des transports, ainsi que de leur importance pour la compréhension et la prévision des systèmes météorologiques synoptiques. Plusieurs autres chapitres du présent Guide portent sur des sujets connexes. La mesure quantitative des précipitations est décrite au chapitre 6 de la Partie I et l'observation des nuages au chapitre 15 de la Partie I. La Partie II traite de sujets particuliers aux observations aéronautiques et maritimes, aux systèmes automatisés, au radar et aux atmosphériques.

Dans le présent chapitre, les observations météorologiques présentant un intérêt pour la détermination du temps présent et passé sont classées selon trois types: les précipitations (hydrométéores en chute dans l'atmosphère), les phénomènes obscurcissants et les particules en suspension dans l'atmosphère (lithométéores et hydrométéores en suspension ou soulevés) et d'autres phénomènes météorologiques (tels les tubas, les grains et les éclairs). Les précipitations liquides ou le brouillard qui laissent un dépôt glacé sur les surfaces sont inclus dans la catégorie appropriée des précipitations et des hydrométéores en suspension.

D'autres phénomènes comme ceux de nature optique (photométéores) ou des électrométéores autres que les éclairs sont des indicateurs de conditions atmosphériques particulières et peuvent être signalés dans l'enregistrement continu de la suite des phénomènes météorologiques, assuré dans chaque station. Toutefois, ils n'entrent nullement dans la détermination du temps présent et passé au moment du codage des observations météorologiques normalisées et ne sont indiqués ici que pour des raisons d'exhaustivité.

14.1.4 Méthodes d'observation

Actuellement, les seuls critères d'observation des différents aspects du temps reposent sur les capacités visuelles et auditives d'un observateur humain qualifié. Toutefois, vu le coût élevé de l'emploi d'un gros effectif d'observateurs qualifiés, un certain nombre de Services météorologiques ont de plus en plus recours à des systèmes d'observation automatisés, non pas simplement pour continuer à obtenir automatiquement des observations de régions reculées en complément de leur réseau de stations surveillées, mais aussi pour constituer leur réseau principal d'observation.

Des recherches fondamentales (Bespalov et al, 1983) ont confirmé qu'il était possible de déterminer les phénomènes météorologiques à partir de l'analyse logique d'un groupe de variables. Il n'existe actuellement aucun détecteur capable de classifier à lui seul le temps présent, pour déterminer cette caractéristi-

que on utilise plutôt des données fournies par une variété de capteurs (visibilité, température, point de rosée, vitesse du vent, et différenciation de la pluie et de la neige). Les systèmes d'observation automatisées sont capables d'effectuer cette analyse logique, mais ils diffèrent quant à leur capacité d'observer le phénomène météorologique voulu, en fonction de leur instrumentation et du degré de complexité de leurs algorithmes. Alors que les systèmes automatisés ne peuvent observer tous les types de phénomènes météorologiques, ils peuvent observer les plus importants, ce qui fait qu'ils représentent une solution rentable par rapport à l'observateur humain compétent.

14.2 OBSERVATION DU TEMPS PRÉSENT ET PASSÉ

Les observations à enregistrer sous les rubriques «temps présent» et «temps passé» comprennent les précipitations (pluie, bruine, neige, granules de glace, neige en grains, poudrin de glace et grêle), les phénomènes obscurcissants et les particules en suspension dans l'atmosphère (brume sèche, poussière, fumée, brume, brouillard, chasse-neige basse et élevée, tempête de poussière ou de sable, tourbillon de poussière), les tubas, les grains et les éclairs.

L'observation du temps présent nécessite l'enregistrement des différents phénomènes en cours à la station ou en vue de la station au moment de l'observation. Dans les messages synoptiques, s'il n'y a aucune précipitation au moment de l'observation, on tient compte des conditions de la dernière heure lorsqu'on choisit le chiffre de code à transmettre.

14.2.1 Précipitations

14.2.1.1 Précisions sur les observations

Le caractère des précipitations peut être défini selon l'une des trois formes suivantes, nommément averses, précipitations intermittentes et précipitations continues. Les averses sont des précipitations tombant de nuages convectifs distincts. Les observateurs (ou les instruments les remplaçant) doivent aussi classer les précipitations selon trois catégories d'intensité, faible, modérée et forte, en fonction de l'intensité même des précipitations ou d'autres facteurs connexes, telle la visibilité.

Le type des précipitations (pluie, bruine, neige, grêle) est le troisième élément important que l'on observe en ce qui concerne les précipitations. Les observations de pluie ou de bruine à des températures basses devraient distinguer si la précipitation se congèle ou

non. Par définition, la pluie et la bruine verglaçantes se transforment en verglas en gelant au contact d'objets solides. Les précipitations solides peuvent se produire sous forme de poudrin de glace, de neige en grains, de cristaux de glace en étoile isolés, de grésil et de grêle, dont les descriptions complètes figurent dans la publication OMM-N° 407.

Les intervalles de valeurs de l'intensité qui correspondent aux qualificatifs faible, modérée et forte sont fonction du caractère des précipitations (intermittentes, continues, averses) et de leur type (pluie, bruine, neige, grêle). Plusieurs réunions mixtes d'équipes d'experts relevant de la Commission des instruments et des méthodes d'observation et de la Commission des systèmes de base ont permis de dresser des tables de correspondances généralement reconnues entre l'interprétation qualitative et subjective d'un observateur et les grandeurs mesurées par un système d'observation automatique du temps présent. L'annexe du présent chapitre fournit un exemple de ce type de tables et de correspondances.

14.2.1.2 **Instruments et appareils de mesure : type des précipitations**

La détermination du type des précipitations constitue un secteur important dans la mise au point de nouveaux instruments. Les systèmes en cours d'évaluation aux fins d'exploitation font appel en général soit à des techniques optiques soit au radar (Van der Meulen, 2003). Des essais sur le terrain (OMM/TD-N° 887) ont montré que tous ces systèmes peuvent détecter la plupart des grands types de précipitations, à l'exception de la neige et de la bruine très faibles, dans plus de 90 % des cas. Le pourcentage de détection de très légères précipitations est habituellement beaucoup plus faible². Il faut des algorithmes très poussés pour différencier divers types de précipitations. Il est par exemple difficile de distinguer la neige mouillée ou fondante de la pluie. Il est présenté dans ce qui suit des capteurs du type des précipitations.

- **Capteur du temps présent par mesure de la diffusion frontale et de la rétrodiffusion (diffusomètre)**

Il existe différents types de capteurs du temps présent qui mesurent en particulier le type des précipitations. La diffusion d'un faisceau lumineux par les particules de précipitations est observée en général suivant un angle fixe. Cela permet de recueillir des informations sur la taille des particules. Des mesures complémentaires, notamment la teneur en eau des particules, la vitesse de chute et la température, apportent des informations qui contribuent

à la détermination de la nature des particules. À titre d'exemple, des particules relativement grosses, mais de faible teneur en eau seraient classées comme étant de la neige. Il peut arriver que ces capteurs signalent des précipitations inconnues quand, l'intensité étant trop faible, il est impossible de déterminer le genre de l'hydrométéore. Outre le type des précipitations, ces capteurs (en fonction de leur type) peuvent aussi indiquer l'intensité des précipitations, leur durée (avec alors la possibilité de préciser si elles sont intermittentes) et la visibilité.

D'un usage répandu, ces capteurs donnent en général des résultats acceptables pour les types de précipitations les plus courants (pluie et neige), le taux de détection variant entre 70 et 90 % (OMM/TD-N° 887) suivant la configuration précise du test et l'instrument. D'autres types de précipitations ne sont pas bien observés, en particulier la pluie et la neige mêlées. La grêle n'est pas observée. Le seuil des précipitations faibles peut varier.

- **Disdromètre optique**

Les disdromètres optiques servent aussi à déterminer le type des précipitations. Ces instruments mesurent l'atténuation d'un faisceau lumineux horizontal (dans l'infrarouge) pour détecter les hydrométéores. Quand une particule passe dans le faisceau lumineux, l'intensité est réduite au niveau du récepteur. Une corrélation est établie entre l'amplitude de l'atténuation et la taille des particules, et une autre entre la durée de l'atténuation et la vitesse de chute des particules. C'est en combinant ces deux grandeurs que l'appareil détermine le type des particules.

Ces capteurs fournissent aussi en général des résultats acceptables pour les types de précipitations les plus courants. Le taux de détection, à comparer à celui obtenu par un observateur humain, est similaire à celui qu'obtiennent les capteurs de rétrodiffusion (Bloemink, 2005). Là encore, la détection de la pluie et la neige mêlées et de la grêle pose des problèmes. Ce type de capteur est relativement nouveau sur le marché.

- **Radar Doppler**

On peut aussi utiliser certains radars Doppler pour déterminer le type des précipitations. Le faisceau émis verticalement par le radar est en partie rétrodiffusé par les hydrométéores en mouvement. Il est ainsi possible de déterminer la vitesse de chute des particules à partir de l'effet Doppler attribué au signal rétrodiffusé. Près du sol, il s'agit de vitesses de chute limites dont on déduit la taille des particules. Pour déterminer le type des précipitations, certains instruments sondent un volume situé au-dessus du capteur, d'autres mesurent la vitesse de chute à dif-

² Le seuil de détection de la pluie est égal à 0,02 mm h⁻¹ (voir annexe 1.B, chapitre 6 de la Partie I).

férentes altitudes au-dessus du capteur. Des mesures complémentaires sont aussi utilisées (la température de l'air en surface, par exemple).

Il existe différents types de radars Doppler utilisés pour détecter le type des précipitations. Ils sont généralement insensibles aux petites particules, ce qui est le cas de toutes les techniques de mesure par radar. Certains types fournissent des résultats comparables aux capteurs mesurant la diffusion frontale et la rétrodiffusion et aux disdromètres, à savoir des résultats acceptables pour la pluie et la neige, mais pas pour la pluie et la neige mêlées. La grêle n'est pas observée.

• Capteur d'impact

Ce type de capteur consiste en un matériau piézoélectrique capable de détecter l'impact des hydrométéores. La différence entre l'impact des grêlons et celui des gouttes de pluie est suffisamment importante pour que le capteur puisse établir la distinction entre ces deux types de précipitations. Les autres types de précipitations ne peuvent être signalés.

Seules la pluie et la grêle pouvant être détectées, on ne peut considérer ce type d'appareil comme véritable capteur du temps présent. Sa capacité de détection de la grêle le rend cependant utile pour répondre aux besoins de certains usagers, puisque c'est là un point faible pour les autres types de capteurs de temps présent.

• Capteur acoustique

Le capteur acoustique détecte le son émis par l'impact d'hydrométéores. Une corrélation est établie entre ce son et le type des précipitations. Ce type de capteur a été mis au point en complément des capteurs du temps présent par mesure de la diffusion frontale et de la rétrodiffusion, en particulier pour améliorer la détection de la grêle et des granules de glace.

Les premiers résultats fournis par ce capteur sont prometteurs (Wade, 2003).

• Autres méthodes

Il est également possible d'utiliser une caméra pour surveiller le type des précipitations. Il faut alors qu'un observateur ou un opérateur puissent visualiser, à partir d'une installation centrale, les images transmises par différentes caméras. Cela exige un arrière-plan adapté à l'observation des précipitations. Cette méthode nécessitant la présence d'un observateur ou d'un opérateur, on ne peut parler de mesure automatique du temps présent ou passé.

Un capteur spécialement conçu pour détecter la pluie se congelant ou le verglas est utilisé en exploitation (Starr et Cauwenbergh, 1991). Il détecte l'ac-

cumulation de glace sur une sonde. La sonde vibre à une fréquence proportionnelle à sa masse. Quand la glace colle à la sonde, la masse de cette dernière varie et la fréquence décroît. Le capteur comprend un corps chauffant pour dégeler la sonde à la demande. Ce capteur s'est révélé efficace pour identifier la neige mouillée.

Il est possible d'utiliser des capteurs de givrage pour détecter les précipitations se congelant. Il existe pour cela diverses méthodes. L'une d'entre elles consiste à mesurer la masse de la glace s'accumulant sur une perche. Une autre fait appel à un capteur de vibration à ultrasons dont la fréquence varie quand il est couvert de glace. Des essais importants se sont déroulés récemment (Fikke, 2007). Les résultats obtenus grâce aux capteurs de temps présent s'améliorent quand il est tenu compte des données fournies par des capteurs de givrage, en particulier en ce qui concerne la pluie se congelant (Sheppard, 2002). Le système automatisé d'observations météorologiques (AWOS) utilise cette technique.

14.2.1.2 Instruments et appareils de mesure : intensité et caractère des précipitations

Les relevés de temps présent comprennent une indication de l'intensité des précipitations et donc du caractère des précipitations (averses, précipitations intermittentes ou précipitations continues). Dans de nombreux cas, cette indication est fournie par un capteur qui détecte également le type des précipitations, mais il est possible aussi d'avoir recours à un capteur différent. La mesure de l'intensité permet aussi de déterminer s'il s'agit de précipitations intermittentes (des averses de neige, par exemple). Une grande campagne de comparaison a pris fin récemment (OMM/TD-N° 1304 et OMM/TD-N° 1504). Elle portait sur la mesure de l'intensité des précipitations par les pluviomètres et étudiait différents types d'instruments et de méthodes d'observation. Il est présenté dans ce qui suit des méthodes automatiques de mesure de l'intensité des précipitations.

• Capteur du temps présent par mesure de la diffusion frontale et de la rétrodiffusion (diffusomètre)

Ce type de capteur est décrit dans la section 14.2.1.1. En combinant le spectre granulométrique, le nombre des particules et le type des précipitations, il est possible de calculer l'intensité des précipitations. L'incertitude associée à ce calcul est en général plus grande que celle associée à des méthodes plus classiques (pluviomètres à balance, pluviomètres à augets basculeurs, etc.). En ce qui concerne l'intensité des précipitations, l'étalement des instruments se révèle aussi problématique. Quand il s'agit d'obtenir une indication relativement grossière de l'intensité

(faible, forte, etc.), il est possible d'utiliser de tels capteurs. Les fabricants poursuivent leurs recherches pour affiner ces résultats.

• Disdromètre optique

Ce type de capteur est décrit dans la section 14.2.1.1. En combinant le spectre granulométrique, le nombre des particules et le type des précipitations, il est possible de calculer l'intensité des précipitations. La technique employée étant analogue à celle décrite dans le paragraphe précédent, l'analyse est la même également. Des travaux de recherche portent aussi sur l'amélioration des résultats (voir par exemple Lanzinger, 2006).

• Radar Doppler

Ce type de capteur est décrit dans la section 14.2.1.1. En combinant le spectre granulométrique, le nombre des particules et le type des précipitations, il est possible de calculer l'intensité des précipitations. Les résultats obtenus pour l'intensité des précipitations montrent une assez bonne corrélation ($O(0,9)$) avec les pluviomètres traditionnels quand la mesure porte sur un intervalle de temps de 30 min (Peters, 2002).

• Pluviomètre

Les différents types de pluviomètres traditionnels fonctionnant selon différents principes sont nombreux. Ils sont décrits dans le chapitre 6 de la Partie I. Ils sont conçus en général pour mesurer la hauteur des précipitations, mais certains instruments, parmi les plus petits, sont spécialement mis au point également pour donner une indication de l'intensité des précipitations. Les pluviomètres destinés à la mesure de la hauteur des précipitations fournissent souvent une mesure relativement moins exacte de l'intensité des précipitations. Mais il suffit simplement d'une indication de l'intensité des précipitations pour les besoins de l'observation du temps présent. Là encore, de nombreux fabricants poursuivent leurs efforts pour améliorer la mesure de l'intensité des précipitations par ces instruments (OMM/TD-N° 1304 et OMM/TD-N° 1504).

14.2.1.3 Instruments et appareils de mesure : systèmes multicapteurs

Pour déterminer les caractéristiques du temps présent et les quantités de précipitations, les systèmes d'observation utilisent des algorithmes qu'alimentent les données fournies par divers capteurs. Cette méthode multicapteurs place une contrainte sur les techniques en jeu. Les observations utiles sont en général la mesure des précipitations, de la visibilité, de la température de l'air, du point de rosée et du plafond. Les algorithmes se caractérisent par des fonctions de filtrage (exemple: l'observation de précipitations liquides n'est possible que si la température de l'air est supérieure à 6°C).

Les systèmes météorologiques routiers utilisent aussi différents capteurs pour déterminer le temps présent (voir aussi la section 14.3 – Observation de l'état du sol).

14.2.2

Phénomènes obscurcissants et particules en suspension dans l'atmosphère

14.2.2.1 Précisions sur les observations

Dans les messages qui prennent en compte les conditions atmosphériques de l'heure qui précède l'observation, il faut distinguer la brume sèche de la brume ou du brouillard. Avec la brume sèche, l'air est relativement sec, alors qu'avec la brume ou le brouillard, il y a généralement évidence d'une forte humidité sous forme de gouttelettes d'eau ou de givre sur l'herbe, les feuilles, etc. Si la station est équipée d'instruments de mesure, on ne peut guère se tromper en supposant que l'obscurcissement est dû à la brume sèche lorsque l'humidité relative est inférieure à un certain taux (80 % par exemple) et la visibilité reste supérieure à certaines valeurs seuils (1 km horizontalement et 2 km verticalement, par exemple). La brume se manifeste à des taux d'humidité élevés, avec une visibilité de 1 km ou plus. Quand un message d'observation synoptique comporte une indication de brouillard, il s'agit de brouillard ou de brouillard glacé, la visibilité horizontale en surface étant inférieure à 1 km.

Le givre est causé par la solidification en glace de gouttelettes d'eau de brouillard au contact d'objets solides dont la température est inférieure au point de congélation. Les codes du temps présent et du temps passé ne font pas la distinction entre les différents types de givre. L'indication de brouillard dans les codes de temps présent et de temps passé doit être interprétée comme telle. Par ailleurs, dans les résumés climatologiques, toute indication d'une visibilité inférieure à 1 km est associée à du brouillard.

La chasse-neige basse ou la chasse-neige élevée est de la neige soulevée par le vent après être tombée. Dans le code du temps présent, il est établi une distinction entre la chasse-neige basse et la chasse-neige élevée, la première s'appliquant à de la neige qui ne s'élève pas plus haut que le niveau de l'œil de l'observateur.

Voici d'autres phénomènes météorologiques également indiqués: les poussières en suspension dans l'air d'une manière généralisée, les poussières ou le sable brassés par le vent, les tempêtes de poussière ou de sable dues à des vents turbulents qui soulèvent de grandes quantités de poussière ou de sable dans l'air et réduisent gravement la visibilité, les tourbillons de poussière ou de sable et parfois les trombes.

La publication OMM-N° 407 doit être à la disposition de l'observateur afin de l'aider dans ses observations.

14.2.2.2 **Instruments et appareils de mesure : phénomènes obscurcissants et particules en suspension dans l'atmosphère**

Le traitement complexe des valeurs mesurées utilisées en tant que prédicteurs peut servir de méthode d'identification des caractéristiques des phénomènes obscurcissants et des particules en suspension. Cette méthode nécessite la recherche de grandeurs météorologiques associées à la formation, l'intensification et la disparition du phénomène, de même que la détermination des conditions seuils. Le problème de l'identification du brouillard, de la brume, de la brume sèche, des tempêtes de neige et des tempêtes de poussière a été étudié (Goskomgidromet, 1984 et OMM/TD-N° 50). La portée visuelle météorologique est l'élément indicateur le plus important. Parmi les variables restant, la vitesse du vent, l'humidité, la température et le point de rosée se sont révélés des critères importants d'identification.

Comme cela est décrit dans le chapitre 9 de la Partie I consacré à la mesure de la visibilité, en particulier dans la section 3, il est possible d'utiliser des instruments de mesure de la visibilité pour déterminer la portée visuelle météorologique. Il est à noter que s'ils servent à déterminer la présence de brouillard, de brume ou de brume sèche, ces instruments peuvent être limités en portée à quelques kilomètres. Voici trois types d'instruments servant à ces fins.

• Transmissiomètre

Les transmissiomètres mesurent l'affaiblissement d'un faisceau lumineux sur une distance connue. La source lumineuse est en général une lampe à décharge et la distance parcourue par le faisceau se situe entre 10 et 200 m. En déterminant le coefficient d'atténuation de l'atmosphère, l'instrument donne une mesure de la visibilité. Afin d'élargir le spectre de mesure, il est possible d'utiliser deux récepteurs à des distances différentes (transmissiomètres à ligne de base double). Les transmissiomètres se prêtent bien à la mesure de la visibilité et sont très répandus, en particulier sur les aérodromes; leur exactitude diminue avec la visibilité. Ils nécessitent une installation et une maintenance relativement onéreuses, ainsi qu'un nettoyage régulier.

• Diffusomètre à diffusion frontale

Ce capteur est décrit dans la section 14.2.1.1. Outre le type des précipitations, il permet aussi de mesurer la visibilité. Il est établi une relation entre le coefficient de diffusion et l'atténuation optique qui est déterminée empiriquement par étalonnage en com-

paraison du signal d'un transmissiomètre. Les diffusomètres à diffusion frontale se prêtent bien également à la mesure de la visibilité et sont de plus en plus répandus. Leur étalonnage n'est pas une mince affaire et nécessite beaucoup de soin, ce qui est un inconvénient. L'installation et la maintenance sont relativement peu onéreuses, et l'instrument ne nécessite pas un nettoyage aussi fréquent que les transmissiomètres.

• Lidar

Des lidars relativement compacts peuvent servir à mesurer la visibilité en vue de déterminer la présence de brouillard. Une diode laser émet une impulsion lumineuse et le signal retour, réfléchi par les particules constituant le brouillard ou la brume sèche, est mesuré par l'optique de réception. La visibilité est calculée à partir de l'intensité de la lumière réfléchie et de la durée de parcours. Le lidar mesure un spectre de visibilité relativement restreint, mais cela suffit pour déterminer la présence de brouillard ou de brume sèche notamment.

14.2.3 **Autres phénomènes météorologiques**

14.2.3.1 **Précisions sur les observations**

La reconnaissance et l'observation des tubas importent tout particulièrement pour la sécurité des personnes et des biens.

tubas : Ce phénomène est un tourbillon de vent souvent violent, révélé par la présence d'une colonne nuageuse ou d'un nuage en cône inversé (nuage en entonnoir), émergeant de la base d'un cumulonimbus. Le nuage peut descendre jusqu'à atteindre la surface terrestre, auquel cas l'eau, la poussière, le sable ou les débris peuvent être soulevés et produire un «buisson» à la périphérie de l'entonnoir de trombe. Son diamètre peut varier de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Un nuage en entonnoir caractérisé est appelé trombe terrestre ou tornade au-dessus du sol et trombe marine au-dessus de l'eau, lorsque la colonne d'air tourbillonnante atteint la surface. Les vitesses de vent associées aux trombes terrestres les plus violentes peuvent atteindre 150 m s⁻¹.

Tourbillons de poussière ou de sable : Il s'agit d'une colonne d'air en rotation rapide généralement au-dessus d'une surface sèche, poussiéreuse ou sableuse, transportant de la poussière et d'autres débris légers provenant du sol. Les tourbillons de poussière ou de sable ont quelques mètres de diamètre. En principe, leur hauteur varie de 60 m à 90 m. Dans les régions désertiques très chaudes, les tourbillons de poussière ou de sable caractérisés peuvent atteindre 600 m.

Grain : Un vent violent qui s'élève soudainement, dure quelques minutes, puis disparaît s'appelle un grain. Les grains sont fréquemment associés au passage des fronts froids. Dans de telles circonstances, ils se produisent en ligne et sont accompagnés le plus souvent par une baisse abrupte de la température, un changement dextrogyre du vent (dans l'hémisphère Nord) ou lévogyre (dans l'hémisphère Sud), une augmentation de l'humidité relative et un nuage en forme de rouleau à axe horizontal (grain en ligne).

La définition d'un orage (OMM-N° 182) est un exemple de description exclusivement fondée sur les perceptions d'un observateur humain. Le phénomène doit être considéré comme un orage quand on entend le tonnerre (même si on ne voit pas d'éclair).

14.2.3.2 Instruments et appareils de mesure

La présence d'un nuage en entonnoir ou d'une tornade peut souvent être déterminée avec un radar météorologique (voir chapitre 9, Partie II). Les radars météorologiques Doppler modernes sont devenus très efficaces pour reconnaître les mésocyclones. Ils fournissent rapidement davantage de détails sur ce phénomène météorologique violent que ne le ferait l'observation visuelle seule.

Les grains peuvent être déterminés à partir de la succession discontinue de valeurs mesurées de la vitesse du vent. Si les données d'un anémomètre sont combinées à celles d'une girouette, d'un thermomètre, et d'un hygromètre, l'identification d'un grain apparaît alors possible.

Les orages sont principalement détectés à l'aide de compteurs d'éclairs. D'après les instructions à l'intention des observateurs émanant de différents Services, l'intensité d'un orage (faible, modéré ou fort) est établie en fonction du nombre d'éclairs par unité de temps auquel on peut combiner l'intensité des précipitations ou la vitesse du vent (voir chapitre 7, Partie II).

14.2.4 État du ciel

14.2.4.1 Précisions sur les observations

On utilise les caractéristiques de l'état du ciel pour décrire l'évolution progressive de la nébulosité totale et du plafond ainsi que du type des nuages au cours d'un intervalle de temps donné.

14.2.4.2 Instruments et appareils de mesure

Il est possible de déterminer approximativement les caractéristiques de la nébulosité (nébulosité totale en octas, plafond et couverture totale des différentes couches) à partir des variations du plafond mesuré à

l'aide d'un système optique en appliquant des méthodes statistiques. Évidemment, cela se limite aux couches nuageuses à portée verticale du système de mesure de la base des nuages (Persin, 1987; NOAA, 1988; ICEAWS, 1999).

14.3 OBSERVATION DE L'ÉTAT DU SOL

14.3.1 Précisions sur les observations

Par état du sol, on entend les caractéristiques de la surface terrestre résultant des phénomènes météorologiques récents, qu'on signale sous la forme d'une quantité d'humidité ou de la description de toute couche de particules solides, aqueuses ou non, couvrant la surface naturelle. L'observation de l'état du sol (lettres symboliques E et E') doit être conforme aux spécifications apparaissant dans les tables de code 0901 et 0975 du Manuel des codes (OMM-N° 306).

Le relevé de l'état du sol fait partie des données transmises sur le temps présent, dont l'observation était exécutée exclusivement par des observateurs jusqu'à récemment. La mesure automatique de l'état du sol est relativement nouvelle et peu utilisée.

14.3.2 Instruments et appareils de mesure

Les recherches ont montré qu'il était possible d'établir une différence entre les principaux types d'état du sol par des phénomènes de réflexion et de diffusion (sec, humide, mouillé, couvert de neige, de givre ou de glace) (Gaumet, Salomon et Paillasse, 1991). Voici une brève description des méthodes employées.

• Diffusomètre

Il s'agit de capteurs optiques reposant sur l'analyse des phénomènes de diffusion et de réflexion de la lumière par une surface plane. L'emploi de différentes sources de lumière est possible. Il peut s'agir d'un faisceau de lumière blanche dont la réflexion par une plaque de référence varie en fonction de l'état de la surface de cette plaque. D'autres capteurs, notamment pour les besoins des réseaux routiers, analysent la réflexion d'une lumière infrarouge par le revêtement d'une route. Dans ce cas, c'est la longueur d'onde de la lumière réfléchie qui est fonction de l'état de la surface. Tous les capteurs ne sont pas adaptés pour répondre aux besoins météorologiques, notamment quand la surface réfléchissante est différente d'une surface naturelle. Ces capteurs sont en cours d'amélioration.

• Capteur capacitif

Un nouveau capteur capacitif est actuellement mis au point et subit des essais. Un tapis à trame formé de bandes conductrices est placé sur une surface (naturelle). Cela constitue en fait un condensateur, le sol naturel agissant comme un diélectrique. La constante diélectrique du sol varie énormément en fonction de l'humidité. La capacité dépendant de l'humidité de la surface considérée, il est possible de déterminer l'état du sol en mesurant les valeurs absolues et la phase des signaux émis sur deux fréquences. Selon les premiers résultats des essais réalisés, ce capteur, en cours de mise au point, paraît prometteur.

• Ensemble de capteurs

Il s'agit d'un ensemble de capteurs, conçu en particulier pour les besoins de la mesure des conditions routières, qui permet de déterminer l'état d'une surface. À titre d'exemple, il est possible de déterminer la couverture de surface par détection optique, de déterminer la présence de substances chimiques et de mesurer la température de surface et la température du sol par mesure de la conductivité, etc. Toutes ces mesures, combinées avec des données atmosphériques, peuvent permettre d'établir les conditions routières. Il y a lieu de noter cependant que l'état du sol est défini comme étant l'état de la surface naturelle à un moment donné et que la méthode dont il est question ici ne détermine pas exactement l'état du sol, mais plutôt une propriété en relation avec celui-ci.

• Caméras (+ observateur)

Il est également possible d'utiliser des caméras pour déterminer l'état du sol. Celles-ci sont alors pointées vers différentes surfaces et il appartient à un observateur ou à un opérateur de déterminer l'état du sol. Comme on ne peut parler de mesure automatique dans ce cas, cette méthode n'est pas étudiée ici.

14.4 OBSERVATION DE PHÉNOMÈNES PARTICULIERS

14.4.1 Phénomènes électriques (électrométéores)

Les électrométéores correspondent soit à des décharges électriques discontinues (éclairs, tonnerre) soit à des phénomènes plus ou moins continus (feu Saint-Elme et aurore polaire). L'Atlas international des nuages (OMM-N° 407) donne une description complète des électrométéores.

Les messages spéciaux d'observation d'éclairs comprennent des renseignements sur le type, l'intensité et la fréquence des éclairs et sur les azimuts extrêmes entre lesquels ces décharges sont observées, il y a lieu de noter également le laps de temps qui s'écoule entre l'éclair et le coup de tonnerre correspondant. Il ne faut pas confondre l'éclair lui-même et son reflet éventuel sur des nuages ou de la brume sèche. Des systèmes de détection automatique de l'emplacement des éclairs sont en service dans de nombreux pays. Le chapitre 7 de la Partie II renferme davantage d'informations sur ce sujet.

Il convient de décrire en détail les aurores polaires exceptionnelles. On peut utiliser des filtres lumineux pour améliorer la qualité des observations, ainsi que des théodolites ou des clinomètres (alidades) pour accroître l'exactitude des mesures angulaires.

14.4.2 Phénomènes optiques (photométéores)

Un photométéore est un phénomène lumineux, engendré par réflexion, réfraction, diffraction ou interférences de la lumière solaire ou lunaire. Les photométéores peuvent être observés dans une atmosphère plus ou moins claire (mirage, tremblement, scintillation, rayon vert et teintes crépusculaires), à la surface ou au sein des nuages (phénomènes de halo, couronne, irisations et gloire), ou encore à la surface ou au sein de certains hydrométéores ou lithométéores (gloire, arc-en-ciel, arc-en-ciel blanc, anneau de Bishop et rayons crépusculaires).

Il appartient aux observateurs de noter soigneusement tout phénomène optique qui se produit. Dans la mesure du possible, la description écrite du phénomène est accompagnée de dessins et de photographies. Une description complète de ces phénomènes figure dans l'Atlas international des nuages (OMM-N° 407); certains manuels de l'observateur (Meteorological Office, 1982, par exemple) contiennent des instructions concises pour l'observation des phénomènes les plus courants.

Pour des mesures précises, le théodolite est un instrument très pratique, mais, lorsqu'on ne dispose pas de cet instrument, on peut se servir d'un bâton gradué tenu à bout de bras. La position d'une apparition telle qu'un faux soleil peut être déterminée en la notant par rapport à des points de repère fixes au sol. Le diamètre d'une couronne peut être estimé en prenant le diamètre angulaire du soleil ou de la lune comme étant approximativement égal à un demi-degré.

ANNEXE

CRITÈRES D'INTENSITÉ DES PRÉCIPITATIONS FAIBLES, MODÉRÉES ET FORTES¹

(Définition des précipitations faibles, modérées et fortes en fonction du type et de l'intensité² des précipitations)

<i>Variable</i>	<i>Quantité correspondante</i>	<i>Qualificatif d'intensité</i>
Bruine	$i < 0,1 \text{ mm h}^{-1}$	faible
	$0,1 \leq i < 0,5 \text{ mm h}^{-1}$	modérée
	$i \geq 0,5 \text{ mm h}^{-1}$	forte
Pluie (y compris averses)	$i < 2,5 \text{ mm h}^{-1}$	faible
	$2,5 \leq i < 10,0 \text{ mm h}^{-1}$	modérée
	$10,0 \leq i < 50,0 \text{ mm h}^{-1}$	forte
	$\geq 50,0 \text{ mm h}^{-1}$	violente ³
Neige (y compris averses)	$i < 1,0 \text{ mm h}^{-1}$ (équivalent en eau)	faible
	$1,0 \leq i < 5,0 \text{ mm h}^{-1}$ (équivalent en eau)	modérée
	$i \geq 5,0 \text{ mm h}^{-1}$ (équivalent en eau)	forte

Pluie et neige mêlées

Mêmes critères que pour la neige (le rapport quantitatif entre la pluie et la neige ne faisant l'objet d'aucune mesure, un choix facile s'impose).

Grèle : Mêmes critères que pour la pluie.

Granules de glace : Mêmes critères que pour la neige.

Précipitations se congelant : Mêmes critères que pour les précipitations sans congélation.

Guide d'approximation pour l'intensité de la neige

Faible : Flocons de neige petits et épars; en l'absence d'autres phénomènes obscurcissants, la visibilité est en général réduite par une chute de neige de cette intensité, sans toutefois descendre au-dessous de 1 000 m.

Modérée : Flocons de neige plus gros et plus nombreux, réduisant en général la visibilité à entre 400 et 1 000 m.

Forte : Flocons de neige nombreux et de toutes tailles, réduisant en général la visibilité à moins de 400 m.

Averses ou précipitations intermittentes

Les systèmes automatiques devraient signaler les averses et les précipitations intermittentes. Le qualificatif « intermittent » peut se définir comme suit: un arrêt des précipitations inférieur ou égal à 10 min entre deux périodes de précipitations, c'est-à-dire qu'en cas d'arrêt des précipitations pendant 10 min sur la période de calcul de la moyenne mobile sur 10 min des précipitations au cours de l'heure écoulée, il convient de signaler des précipitations intermittentes.

Représentativité des phénomènes de temps présent

Il est fort possible de déterminer le phénomène de temps présent à signaler sur une période d'observation de 3 min. Il convient pour cela de signaler, pour le temps présent, la moyenne mobile sur 3 min la plus élevée observée au cours de la période d'observation de 10 min.

¹ Critères recommandés par les participants à la réunion d'experts OMM sur l'automatisation des observations visuelles et subjectives (Trappes/Paris, France, du 14 au 16 mai 1997) et par le Groupe de travail des mesures en surface (Genève, Suisse, du 27 au 31 août 2001).

² Les valeurs de l'intensité correspondent à une moyenne sur trois minutes.

³ L'adjectif « violent » utilisé pour décrire l'intensité des précipitations, manque de cohérence par rapport aux autres qualificatifs et peut être source de confusion. Il serait peut-être préférable d'employer d'autres termes, notamment « intense » ou « extrême ».

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Bespalov, S.M. et.al., 1983 : *Osnovnye voprosy razrabotki setevoy avtomaticheskoy gidrometeorologicheskoy stancii* (Aspects principaux de la conception d'un réseau de stations hydrométéorologiques automatiques). Trudy GGO, 473, pp. 3 à 12, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Bloemink, H.I. et E. Lanzinger, 2005 : *Precipitation type from the Thies disdrometer*. Communication présentée à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-2005), Bucarest, Roumanie. Rapport N° 82 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1265, Genève.
- Fikke, S. et. al., 2007: COST727 : *Atmospheric Icing on Structures, Measurements and data collection on icing: State of the Art*, publication n° 75 de Météo-Suisse, 110 pp., 2007.
- Gaumet, J.L., P. Salomon et R. Paillisse, 1991 : *Automatic observations of the state of the soil for meteorological applications*. Tirage préliminaire des actes du *Seventh Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation: Special Sessions on Laser Atmospheric Studies*, American Meteorological Society. La Nouvelle-Orléans, 14-18 janvier 1991, pp. J191 à J193, États-Unis d'Amérique.
- Goskomgidromet, 1984 : *Opredelenije atmosfernykh javlenij po dannym avtomaticheskikh stancij, soveqaniye gruppy ekspertov GMS/MS socialisticeskich stran po teme 9.1. KR GMS/MS* (Identification de phénomènes atmosphériques à partir de données de stations météorologiques automatiques, réunion du groupe de pays socialistes GMS/MS sur le thème 9.1), Obninsk, du 24 au 28 août 1984, Moscou.
- ICEAWS, 1999 : *Second International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations* (Vienne, du 27 au 29 septembre). *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, N° 20 (sur CD-ROM uniquement), ZAMG, Vienne, Autriche.
- Lanzinger, E., M. Theel et H. Windoph, *Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor*. Communication présentée à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-2006), Genève, Suisse. Rapport N° 94 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1354, Genève.
- Meteorological Office, 1982 : *Observer's Handbook*, quatrième édition. Her Majesty's Stationery Office, Londres, Royaume-Uni.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 1988 : *Federal Standard Algorithms for Automated Weather Observing Systems Used for Aviation Purposes*.
- Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, United States Department of Commerce, FCM-S5-1988, Washington, D.C., États-Unis d'Amérique.
- Organisation météorologique mondiale, 1975 : *Atlas international des nuages : Manuel de l'observation des nuages et des autres météores*. Volume I, OMM-N° 407, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1985 : *Algorithms for automatic coding of the present and past weather by unmanned meteorological stations* (M. Mezősi, A. Simon, P. Hanák et O. Szenn). *Communications présentées à la troisième Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECIMO-III)*, Ottawa, 8-12 juillet 1985, Rapport N° 22 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 50, Genève, pp. 255 à 259.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Vocabulaire météorologique international*. Deuxième édition, OMM-N° 182, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel des codes*, volumes I.1 et I.2, OMM-N° 306, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998 : *WMO Intercomparison of Present Weather Sensors/Systems: Final Report* (Canada et France, 1993–1995) (M. Leroy, C. Bellevaux et J.P. Jacob). Rapport N° 73 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 887, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2006 : *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (France, Italie, Pays-Bas, 2004–2005), L. Lanza, M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi et W. Wauben. Rapport N° 84 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1304, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2009 : *WMO Filed Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (Italie, 2007–2009), E. Veurich, C. Monesi, L.G. Lanza, L. Stagi et E. Lanzinger. Rapport N° 99 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1504, Genève.
- Persin, S.M., 1987 : *Izmerenije vysoty niznej granicy oblakov i charakteristika oblachnosti kak zadaca paspoznavaniya obrazov* (Mesure du plafond nuageux et identification de la nébulosité). Trudy GGO, 512, pp. 49 à 91, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Peters, G, B. Fischer et T. Andersson, *Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar, (MRR)*, Boreal Env. Res. no. 7, pp; 353 à 361, 2002.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Sheppard, B.E. et P.I. Joe, *Automated Precipitation Detection and Typing in Winter : a Two-Year Study*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Vol. 17, n° 11, pp. 1493 à 1507 (2000).
- Starr, K.M. et R. van Cauwenbergh, 1991 : The development of a freezing rain sensor for automated surface observing systems. Tirage préliminaire des actes du *Seventh Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation : Special Sessions on Laser Atmospheric Studies*, American Meteorological Society. La Nouvelle-Orléans, 14-18 janvier 1991, pp. 338 à 343, États-Unis d'Amérique.
- Van der Meulen, J.P., 2003 : *Present Weather – Science : Exploratory Actions on Automatic Present Weather Observations*. Final Report, E-PWS-SCI, KNMI, de Bilt, Pays-Bas, EUMETNET (disponible sur l'Internet : http://www.knmi.nl/~samenw/geoss/eumetnet/E-PWS-Sci/report/PWS-Sci_final_report.pdf).
- Wade, C.G., *Detecting Ice Pellets, Snow Pellets and Hail on ASOS using an Acoustic Sensor*, 12th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, février 2003, Long Beach, États-Unis d'Amérique.

CHAPITRE 15

OBSERVATION DES NUAGES

15.1 GÉNÉRALITÉS

Observer les nuages et estimer ou mesurer la hauteur de leur base au-dessus de la surface terrestre sont importants à de multiples fins et plus spécialement pour l'aviation et diverses autres applications pratiques de la météorologie. Le présent chapitre expose les méthodes les plus répandues dans ce domaine. On trouvera d'autres renseignements très utiles dans l'Atlas international des nuages (OMM-N° 407), dont les deux volumes contiennent les descriptions scientifiques des principaux genres de nuages avec des illustrations destinées à en faciliter l'identification, ainsi que des informations sur les pratiques spécifiques à la météorologie aéronautique dans le Guide des systèmes d'observation et de diffusion de l'information météorologique aux aérodromes (OMM-N° 731).

15.1.1 Définitions

Nuage : Amas de minuscules gouttelettes d'eau, cristaux de glace ou d'un mélange des deux, dont la base se situe au-dessus de la surface terrestre et qui est perceptible depuis le lieu d'observation. Le diamètre limite des particules liquides est de l'ordre de 200 µm; les gouttes de taille plus importante constituent de la bruine ou de la pluie.

À quelques rares exceptions (par exemple les nuages nacrés et nocturnes lumineux) et des cirrus qui apparaissent parfois dans la basse stratosphère, les nuages ne se forment que dans la troposphère, principalement sous l'effet de la condensation de la vapeur d'eau sur des noyaux de condensation dans l'atmosphère. Les nuages se forment dans des contextes de mouvements verticaux de l'air, de convection, de mouvements ascendants forcés par le relief ou de mouvements verticaux de grande échelle associés aux dépressions et aux fronts. Ils peuvent aussi résulter, dans des conditions d'humidité et des laps de temps appropriés, de turbulences à basse altitude et d'autres causes mineures. Les activités humaines, telles que l'aviation ou l'industrie, peuvent aussi provoquer la formation de nuages, par l'ajout de noyaux de condensation dans l'atmosphère.

Par des températures inférieures à 0 °C, les particules de nuages sont souvent composées entièrement de gouttelettes d'eau surfondue, jusqu'à environ -10 °C dans le cas des nuages stratiformes et -25 °C dans

celui des nuages convectifs. En-dessous de ces limites très approximatives et jusqu'à -40 °C environ, de nombreux nuages sont «mixtes» mais les cristaux de glace prédominent dans la partie basse de la gamme de températures.

Nébulosité : Fraction du ciel qu'on estime être couverte par des nuages d'un certain type (nébulosité partielle) ou par une combinaison de nuages. Dans les deux cas, l'unité de mesure est l'octa (un huitième de la voûte céleste) et on donne les résultats en utilisant une échelle où l'on se réfère essentiellement à l'octa le plus proche, sauf que les chiffres 0 et 8 indiquent respectivement un ciel totalement clair et totalement couvert avec ajustement correspondant des autres chiffres près des extrémités de l'échelle.

Base des nuages : Zone la plus basse dans laquelle l'obscurcissement correspondant au passage d'un air clair ou de brume sèche à des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace crée une modification importante du profil du coefficient d'atténuation donné par la rétrodiffusion. Dans l'air sous le nuage, les particules responsables de l'obscurcissement manifestent une certaine sélectivité spectrale; dans le nuage, il n'y a quasiment aucune sélectivité, la différence étant due à la taille des gouttelettes. La hauteur de la base des nuages est définie comme la distance verticale au-dessus du niveau du sol. Pour une station météorologique aéronautique, le niveau du sol (surface) est défini comme l'altitude officielle de l'aérodrome.

Type des nuages (classification) : Plusieurs méthodes de classification des nuages sont utilisées.

- (a) L'Atlas international des nuages (Vol. 1, OMM-N° 407) les répartit en genres selon dix formes caractéristiques principales, puis les subdivise de la façon ci-après :
- Espèces (aspect et structure) ;
 - Variétés (disposition et transparence) ;
 - Particularités supplémentaires et nuages annexes (par exemple, incus, mamma, virga, praecipitatio, arcus, tuba, pileus, velum et pannus) ;
 - Développement d'un nuage d'un nouveau genre à partir d'un nuage-origine, indiqué par l'ajout du suffixe «genitus» aux genres du nouveau nuage et du nuage d'origine, dans cet ordre si une portion seulement du nuage d'origine est affectée par la transformation (par

- exemple stratocumulus cumulogenitus), et du suffixe «mutatus» si tout ou presque tout le nuage d'origine est affecté (par exemple stratus stratocumulomutatus).
- (b) Une deuxième classification repose sur le niveau (étage) – supérieur, moyen et inférieur – auquel les genres de nuages se rencontrent ordinairement. Dans les régions tempérées, les limites approximatives vont de 6 à 12 km (20 000 à 40 000 pieds) pour l'étage supérieur, du sol à 6 km (0 à 20 000 pieds) pour l'étage moyen, du sol à 1,5 km (0 à 5 000 pieds) pour l'étage inférieur. Les nuages de l'étage supérieur sont les cirrus (Ci), les cirrocumulus (Cc) et les cirrostratus (Cs); ceux de l'étage moyen sont les altocumulus (Ac), les altostratus (As) (qui débordent souvent sur l'étage supérieur) et les nimbostratus (Ns) (qui s'étendent ordinairement à la fois plus haut et plus bas); ceux de l'étage inférieur sont les stratocumulus (Sc), les stratus (St), les cumulus (Cu) et les cumulonimbus (Cb), les deux derniers atteignant fréquemment aussi les niveaux moyen et supérieur. À des fins synoptiques, on classe les nuages en neuf rubriques à l'intérieur de ces niveaux, en les désignant respectivement par les symboles CH, CM et CL. L'objectif visé est de caractériser l'état du ciel plutôt que d'indiquer les différents types de nuages.
- (c) Des classifications moins officielles se fondent :
- Sur les processus physiques de la formation des nuages, notamment des nuages en montceaux et des nuages en nappe ;
 - Sur la composition des nuages (nuages glacés, nuages liquides et nuages mixtes).

Des photographies illustrent la plupart de ces formes nuageuses dans le Volume 2 de l'*Atlas international des nuages* (OMM-N° 407).

Visibilité verticale : Distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet sur la même verticale que lui-même, vers le haut ou vers le bas. La visibilité verticale peut être calculée à partir du profil d'atténuation mesurée, $\sigma(h)$, comme l'indique le Manuel du Système mondial d'observation (OMM-N° 544). La relation est cependant moins simple que pour la visibilité horizontale, parce que σ peut être considéré comme une valeur qui n'est pas constante. Néanmoins, la règle de $I(h=VV)/I_{l_0} = 5\%$ peut s'appliquer. À partir de cette hypothèse, la visibilité verticale peut être exprimée dans une relation avec $\sigma(h)$ dans laquelle VV est représenté intrinsèquement, soit :

$$\int_{h=0}^{h=VV} \sigma(h) dh = -\ln(5\%) \approx 3 \quad (15.1)$$

(voir également la partie II, chapitre 2, équations 2.6 et 2.7)

15.1.2 Unités et échelles

L'unité de mesure de la hauteur des nuages est le mètre ou, pour certaines applications aéronautiques, le pied (ft). L'unité de mesure de la nébulosité est l'octa, soit le huitième de la voûte céleste recouverte par des nuages telle que l'observateur la voit.

15.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Les éléments qu'il est nécessaire d'observer à des fins météorologiques sont la nébulosité, le type des nuages et la hauteur de leur base. Pour les observations synoptiques, le Manuel des codes (OMM-N° 306) indique les règles à suivre en vue de décrire au mieux les conditions nuageuses depuis la surface jusqu'aux niveaux élevés. De l'espace, on observe la nébulosité et la température des amas nuageux (dont on déduit la hauteur du sommet des nuages); on peut aussi utiliser des mesures faites depuis l'espace pour suivre l'évolution des nuages et des conditions météorologiques.

Des normes d'exactitude sont fixées dans la partie I, chapitre 1, annexe 1.B.

15.1.4 Méthodes d'observation et de mesure

15.1.4.1 Nébulosité

Généralement, les observations de la nébulosité s'opèrent visuellement. Des méthodes instrumentales sont en cours d'élaboration et utilisées opérationnellement dans certaines applications pour estimer la quantité de nuages bas. Les estimations portent sur la nébulosité dans chaque couche identifiée et sur la nébulosité totale vue du poste d'observation.

La nébulosité totale est la fraction de la voûte céleste cachée par l'ensemble des nuages visibles. Son évaluation consiste donc à estimer quelle portion de la zone apparente du ciel est couverte de nuages.

La nébulosité partielle est la fraction de la voûte céleste cachée par chaque type ou couche de nuage, comme s'il s'agissait du seul type de nuage présent dans le ciel. La somme des nébulosités partielles peut dépasser la valeur de la nébulosité totale et être supérieure à huit octas.

L'échelle à utiliser pour chiffrer la nébulosité est celle figurant dans la table de code 2 700 du Manuel des codes (OMM-N° 306) ; elle est reproduite ci-dessous.

Code	Signification	Chiffre
0	0	0
1	1 octa ou moins, mais pas sans nuages	1/10 ou moins, mais pas sans nuages
2	2 octas	2/10-3/10
3	3 octas	4/10
4	4 octas	5/10
5	5 octas	6/10
6	6 octas	7/10-8/10
7	7 octas ou plus, mais pas 8 octas	9/10 ou plus, mais pas 10/10
8	8 octas	10/10
9	Ciel obscurci par le brouillard et/ou d'autres phénomènes météorologiques	
/	La couverture nuageuse n'est pas discernable pour des raisons autres que le brouillard ou d'autres phénomènes météorologiques, ou aucune observation n'est faite.	

15.1.4.2 Hauteur de la base des nuages

Il est possible de mesurer la hauteur de la base des nuages avec des instruments, ce qui se fait couramment aujourd'hui là où elle constitue un facteur crucial pour des activités opérationnelles. Toutefois, l'estimation de la hauteur de la base des nuages par un observateur humain reste pratique courante.

Plusieurs types d'instruments utilisés en exploitation sont décrits dans ce chapitre. En 1986, certains d'entre eux ont été soumis à une comparaison internationale coordonnée par l'OMM; le compte rendu qui en est fait par Jones et al. (OMM-TD-N° 217) fournit des indications utiles sur les performances des équipements et l'exactitude de leurs mesures.

L'emploi d'instruments pour l'estimation de la hauteur de la base des nuages est important et courant dans le domaine de l'assistance météorologique à l'aéronautique. Cette question sera traitée dans la partie II, chapitre 2.

15.1.4.3 Type des nuages

À l'heure actuelle, la seule méthode d'observation de la plupart des types de nuages est visuelle. Des illustrations et des instructions de chiffrement figurent à cet effet dans de nombreux ouvrages, notamment l'Atlas international des nuages (OMM-N° 407), ainsi que dans des publications de Services météorologiques nationaux.

15.2 ESTIMATION ET OBSERVATION DE LA NÉBULOSITÉ, DE LA HAUTEUR DE LA BASE DES NUAGES ET DU TYPE DE NUAGE PAR UN OBSERVATEUR HUMAIN

15.2.1 Efficacité des estimations

L'endroit d'où se font les estimations devrait offrir la vue la plus étendue possible du ciel, sans qu'aucune lumière permanente n'y perturbe les observations nocturnes. Pour réaliser ces dernières, il est capital que l'observateur laisse à son œil le temps de s'accommoder à l'obscurité.

Dans certaines circonstances, il peut être bien sûr très difficile d'estimer la nébulosité, en particulier la nuit. En possession d'observations antérieures du développement des nuages et d'une connaissance générale de leur structure, l'observateur sera mieux à même d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Il pourra également lui être utile de disposer des rapports d'aéronefs.

15.2.2 Estimation de la nébulosité

L'observateur devrait accorder un poids égal aux zones situées à son aplomb et à celles plus proches de son horizon. Lorsque les nuages sont répartis très irrégulièrement, il est bon de considérer le ciel en quadrants distincts dont les diamètres se recoupent perpendiculairement, puis de prendre la somme des estimations faites pour chaque quadrant comme valeur totale pour l'ensemble du ciel.

Le chiffre de code 9 signifie que du brouillard, une chute de neige, etc. rendent le ciel invisible, ou que l'obscurité ou une lumière parasite ont empêché l'estimation. Les nuits sans lune, il reste habituellement possible d'estimer la nébulosité totale d'après la portion du ciel dans laquelle des nuages estompent ou occultent complètement les étoiles, bien que la présence de brume sèche suffise à produire le même effet à proximité de l'horizon.

L'observateur doit aussi estimer la nébulosité partielle. Il arrive, par exemple, que des nuages bas dissimulent en partie une couche nuageuse plus élevée. De jour, on peut estimer avec une certaine assurance l'étendue de la couche supérieure en surveillant un court instant le ciel: le déplacement des nuages bas par rapport à la couche supérieure devrait révéler si celle-ci comporte des trouées ou couvre entièrement la voûte céleste.

Il convient de noter que l'étendue de chaque type de nuage s'estime indépendamment de la nébulosité totale. La somme des nébulosités partielles est sou-

vent supérieure à la valeur de la nébulosité totale et dépasse fréquemment huit octas.

15.2.3 Estimation de la hauteur de la base des nuages

Dans les stations dépourvues d'équipements de mesure, on ne peut qu'estimer la hauteur des nuages. En montagne, il est possible d'estimer la hauteur de toute base de nuage plus basse que les sommets voisins en se référant à l'altitude de points topographiques bien distincts portés sur les cartes en courbes de niveau. Il est souhaitable de garder sous la main un diagramme détaillé des altitudes et positions de tous les repères éventuellement utilisables. Par un effet de perspective, les nuages semblent parfois reposer sur des sommets lointains et il ne faut pas en tirer de conclusions hâtives quant à leur hauteur au-dessus de la station. L'observateur doit toujours faire preuve de jugement et prendre en considération la forme et l'aspect général des nuages.

Le tableau ci-dessous, valable pour les pays plats situés à moins de 150 m (500 pieds) au-dessus du niveau moyen de la mer, donne l'éventail des hauteurs

entre lesquelles évolue la base de différents genres de nuages dans les régions tempérées. Dans les sites nettement plus élevés ou en montagne, la hauteur de la base des nuages bas au-dessus de la station sera souvent moins importante que ce qu'indique le tableau ci-dessous.

Dans d'autres zones climatiques, en particulier dans des conditions tropicales sèches, les hauteurs de la base des nuages peuvent s'écartez sensiblement des marges ci-dessus, ce qui en rend l'estimation encore plus difficile et entraîne parfois des erreurs de classification. Par exemple, quand des observations d'aéronefs ont confirmé l'existence de cumulus, manifestement d'origine convective, dont les bases se trouvent bien au-dessus de 2 400 m (8 000 pieds) et même à 3 600 m (12 000 pieds). L'observateur au sol a tendance alors à largement sous-estimer la hauteur des bases, soit parce qu'il s'attend à ce que le cumulus soit un nuage « bas » dont la base se situe en dessous de 2 000 m (6 500 pieds) et généralement de 1 500 m (5 000 pieds), soit parce que les conditions atmosphériques se combinent à la forme du nuage pour produire une illusion optique.

Hauteur au-dessus du sol des bases de différents genres de nuage dans les régions tempérées

Genre de nuage	Éventail ordinaire des hauteurs*		Éventail plus large parfois observé et autres remarques	
	(mètres)	(pieds)	(mètres)	(pieds)
Bas				
Stratus	Sol - 600	Sol - 2 000	Sol - 1 200	Sol - 4 000
Stratocumulus	300 - 1 350	1 000 - 4 500	300 - 2 000	1 000 - 6 500
Cumulus	300 - 1 500	1 000 - 5 000	300 - 2 000	1 000 - 6 500
Cumulonimbus	600 - 1 500	2 000 - 5 000	300 - 2 000	1 000 - 6 500
Moyen				
Nimbostratus	(km) Sol - 3	Sol - 10 000	Le Nimbostratus est considéré comme un nuage de l'étage moyen aux fins synoptiques, bien qu'il puisse s'étendre à d'autres étages. L'Altostratus peut s'épaissir et, sa base s'abaissant progressivement, se transformer en Nimbostratus	
Altostratus				
Altocumulus		2 - 6		
		6 500 - 20 000		
Élevé				
Cirrus	6 - 12	20 000 - 40 000	Un cumulonimbus se dissipant peut donner naissance à un cirrus bien en-dessous de 6 km (20 000 pieds) en hiver. Un cirrostratus peut se transformer en altostratus	
Cirrostratus				
Cirrocumulus				

* La hauteur de la base des nuages bas sera souvent moins importante qu'indiquée pour les stations dont l'altitude dépasse 150 m

La nuit, une bonne identification de la forme des nuages conditionne en grande partie le succès d'une estimation directe de la hauteur de leur base. Des connaissances météorologiques générales et une observation attentive du temps aident grandement à juger si la base d'un nuage s'est élevée, abaissée ou est demeurée fondamentalement inchangée. L'un des cas les plus épineux, qui nécessite beaucoup d'attention et de savoir-faire, est celui où des altostratus ont nappé le ciel dans la soirée. Déceler l'abaissement progressif d'une telle couche nuageuse constitue une tâche ardue, mais en descendant, la base reste rarement tout à fait uniforme et l'observateur peut souvent y discerner de petits contrastes, sauf pendant les nuits les plus noires.

15.2.4 Observation du type de nuage

L'observation du type de nuage est réalisée essentiellement par des observateurs humains. Des illustrations et instructions de chiffrement figurent à cet effet dans de nombreux ouvrages, notamment l'Atlas international des nuages (OMM-N° 407) ainsi que dans des publications de Services météorologiques nationaux.

15.3 MESURE DE LA NÉBULOSITÉ AU MOYEN D'INSTRUMENTS

Il n'existe encore aucun capteur au sol qui soit capable de mesurer de manière pleinement satisfaisante la nébulosité totale. On parvient à estimer celle-ci dans de vastes zones en se servant de mesures faites dans le visible avec des radiomètres embarqués à bord d'engins spatiaux et complétées par des images prises dans l'infrarouge, mais le procédé laisse souvent à désirer et ne permet pas, par exemple, de distinguer les stratus bas du brouillard. On peut estimer la densité des nuages de l'étage inférieur dans le rayon d'action d'un télémètre en mesurant la portion du temps écoulé qu'ont occupées des couches bien identifiées et en supposant que la moyenne des résultats sur une durée déterminée est représentative des conditions autour du poste d'observation. Suffisant dans de nombreux cas pour les besoins de la météorologie synoptique, ce procédé ne l'est pas pour ceux de la météorologie aéronautique, car il expose à commettre des erreurs significatives dans l'estimation de la nébulosité au-dessus d'un aérodrome. Une technique applicable aux stations automatiques, dite de «clustering» (agglutination) et reposant sur l'emploi de données de télémètres, a été mise au point aux États-Unis. D'autres pays, comme la Suède (Larsson et Esbjörn, 1995) et les Pays-Bas (Wauben, 2002), ont mis en place des techniques similaires dans leurs systèmes d'observation opéra-

tionnels. Parmi les autres instruments permettant de mesurer la nébulosité figurent les pyromètres capables de sonder plusieurs directions à la fois et/ou de balayer le ciel, ainsi que les caméras panoramiques spécialement conçues à cet effet.

15.3.1 Au moyen d'un célosomètre laser

Plusieurs Services météorologiques utilisent des séries chronologiques de mesures de la base des nuages faites au moyen d'un télémètre laser (cf. section 15.4.1) pour déterminer la nébulosité. Cette méthode présente des avantages par rapport aux observations manuelles. Les mesures faites à l'aide d'un télémètre permettent d'obtenir des résultats plus constants. En outre, le télémètre permet de générer plus fréquemment des données et la nuit n'entrave pas les mesures. Cette méthode a aussi ses inconvénients: elle nécessite que les nuages se déplacent au-dessus du champ de vision de l'instrument, ce qui n'est pas toujours le cas. De plus, même si les nuages se trouvent bien au-dessus du champ de vision du célosomètre, ces nuages ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble du ciel. Ainsi, la série chronologique de la base des nuages ne représente pas toujours l'ensemble du ciel, alors que la mesure de la nébulosité doit se baser sur l'ensemble du ciel. La concordance (avec une marge de 2 octas) entre cette méthode et l'observation manuelle de la nébulosité totale s'établit généralement entre 80 et 90 % (Wauben, 2006).

Dans le système automatisé d'observation en surface (ASOS) du service météorologique national des États-Unis, l'instrument de mesure de la hauteur de la base des nuages (télémètre laser – cf. section 15.4.1) compile toutes les 30 secondes des échantillons de signaux rétrodiffusés et détermine la hauteur des nuages à chaque «échos» valable d'un nuage. Chaque minute, les 30 dernières minutes des données sur 30 secondes sont traitées de manière à donner une double pondération aux 10 dernières minutes, afin de mieux cerner les changements récents de l'état du ciel. Les données sont ensuite triées en différentes «classes» de hauteur.

Chaque minute, si les hauteurs (de la base) des nuages sont réparties dans plus de cinq classes de hauteur (au cours des 30 dernières minutes), elles sont assemblées en couches à l'aide la méthode statistique des moindres carrés, jusqu'à ce qu'il ne reste que cinq classes de hauteur (chaque classe peut contenir plusieurs échos). Ces classes – ou agrégats – sont ensuite classées par hauteur, de la plus basse à la plus haute. Puis, en fonction des hauteurs, le système ASOS détermine si les classes peuvent être combinées et ajustées, en groupes de hauteur significatifs sur le plan météorologique. Les classes qui en résul-

tent deviennent des « couches » et l'algorithme sélectionne jusqu'à trois de ces couches à signaler dans le METAR/SPECI en fonction des couches de nuages à signaler en priorité au niveau national.

La proportion du ciel qui est couverte est déterminée par la somme du nombre total d'échos dans chaque couche et le calcul du ratio entre ces échos et le nombre total d'échos possible. S'il y a plus d'une couche, les échos de la première couche sont ajoutés à la seconde (et à la troisième) pour obtenir la couverture totale. À des fins de comparaison, la nébulosité mesurée par l'ASOS pour chaque couche est ensuite convertie en une fonction statistique équivalant à une observation humaine.

L'algorithme vérifie par ailleurs l'obscurcissement total du ciel en se fondant sur des critères de basse visibilité en surface et d'un taux élevé d'« échos indéterminés » aux niveaux inférieurs.

Un algorithme de l'état du ciel a également été élaboré pour les cas où la formation de nuages (ou advection) se produit généralement dans un endroit connu (ou à partir d'un endroit connu) et entraîne des différences importantes de l'état du ciel au-dessus d'un aéroport. Cet algorithme de discontinuité météorologique utilise des données provenant de deux capteurs de mesure de hauteur de la base des nuages. Le capteur principal est situé près de la zone de toucher des roues de la piste accueillant les instruments principaux. Le second capteur est généralement situé 3 à 6 km (2 à 4 miles) du capteur principal, en amont, dans la direction la plus probable de l'advection, ou au plus près de l'endroit où l'état du ciel est particulier. Le deuxième indicateur de la hauteur des nuages sert à détecter des différences de l'état du ciel suffisamment importantes sur le plan de l'exploitation.

Des informations complémentaires sur l'algorithme de l'état du ciel ASOS et sur ses vérifications ont été mises à disposition par la NOAA (1988) et le Gouvernement des États-Unis (1999).

15.3.2 Au moyen d'un pyromètre

Le pyromètre est simplement un thermomètre infrarouge pointé à la verticale ou dans plusieurs directions et/ou qui peut effectuer un balayage du ciel. La température infrarouge mesurée permet d'indiquer la présence de nuages. Dans le cas d'un balayage, des mesures sont faites pour l'ensemble du ciel, ce qui permet de déterminer la nébulosité.

Les pyromètres à balayage permettent d'éviter les problèmes de représentativité des mesures des autres méthodes, (représentativité qui dépend du nombre

de points sondés). De plus les observations de nuit sont possibles. En revanche, cette méthode a pour inconvénient que les « pixels » fractionnés et/ou transparents sont difficiles à classer. Enfin, certains instruments ne sont pas toujours à l'épreuve des intempéries.

15.3.3 Au moyen d'une caméra panoramique

Il existe des caméras spécialement conçues pour mesurer la nébulosité. Elles observent l'ensemble du ciel à l'aide de miroirs sphériques. L'image du ciel est analysée par un algorithme qui détermine, en mesurant la couleur de chaque pixel, si un nuage est présent. La somme de tous les pixels donne une indication de la nébulosité.

Cette méthode permet d'éviter les problèmes de représentativité des mesures qu'ont d'autres méthodes. Certaines caméras ont besoin de la lumière du jour et ne peuvent donc pas être utilisées de nuit. Les caméras effectuant des mesures infrarouge n'ont pas cet inconvénient, mais leur champ de vision est réduit et leur prix est plus élevé. Les caméras panoramiques nécessitent un entretien régulier, notamment le nettoyage des surfaces optiques.

15.4 MESURE DE LA HAUTEUR DE LA BASE DES NUAGES AU MOYEN D'INSTRUMENTS

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la hauteur de la base des nuages, au moyen notamment d'un télémètre (ou célosmètre) laser, d'un télémètre (ou célosmètre) à faisceau tournant, d'un projecteur ou d'un ballon. La méthode la plus utilisée actuellement est le télémètre laser. Cette technique a de grands avantages sur les autres et doit donc être considérée comme la plus appropriée.

15.4.1 Au moyen d'un célosmètre laser

15.4.1.1 Méthode de mesure

Avec le télémètre laser, on détermine la hauteur de la base des nuages en mesurant le temps que met une impulsion d'une lumière cohérente pour aller d'un émetteur à la base du nuage et revenir à un récepteur (principe du LIDAR). Le laser est pointé verticalement vers le ciel et lorsqu'il rencontre un nuage, son faisceau est diffusé par les hydrométéores constituant le nuage. La majeure partie du rayonnement est diffusée vers le haut, mais une fraction est rétrodiffusée vers le récepteur et focalisée sur un détecteur photoélectrique. Le flux rétrodiffusé vers

le récepteur décroît de manière inversement proportionnelle au carré de la distance. Le télémètre (Figure 15.1) est généralement constitué de deux éléments, un émetteur-récepteur et une unité d'acquisition.

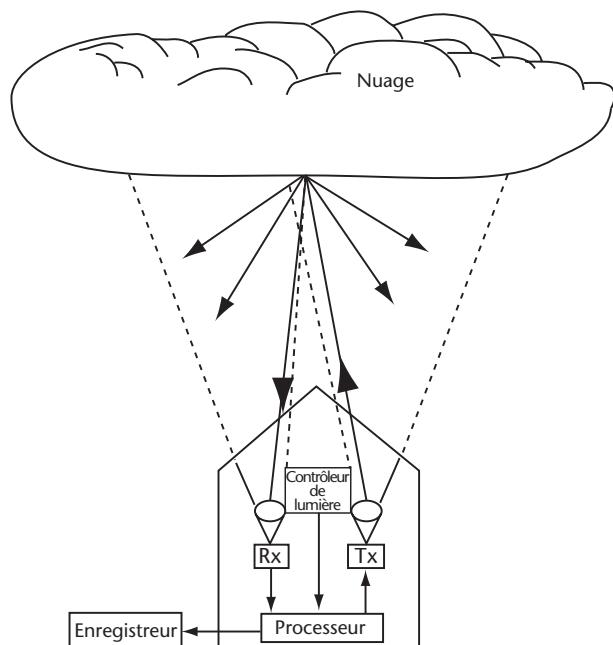


Figure 15.1. Télémètre laser classique

L'émetteur et le récepteur sont installés dans un même caisson, aux côtés des éléments électroniques de détection et de traitement des signaux. La source de lumière est généralement un laser à semi-conducteur dont la longueur d'onde se trouve dans le proche infrarouge. Les optiques de l'émetteur sont disposées de façon que la source laser et le détecteur du récepteur soient au foyer d'un télescope ordinaire ou newtonien. Un enduit spécial passé sur les lentilles réduit la réflexion parasite et favorise la transmission de la lumière. L'ouverture de l'émetteur est protégée par un verre dont la face intérieure est elle aussi recouverte d'un produit antiréfléchissant, et inclinée de manière à faciliter l'écoulement de la pluie.

L'agencement du récepteur est similaire à celui de l'émetteur, à ceci près qu'une photodiode y remplace la source lumineuse et qu'il comporte un filtre optique à bande étroite qui élimine la majeure partie du rayonnement solaire diffus pour améliorer de jour la détection du rayonnement laser rétrodiffusé.

L'émetteur et le récepteur peuvent être montés l'un à côté de l'autre de telle manière que leurs champs de vision commencent à se chevaucher à une distance d'environ 5 m au-dessus de l'assemblage et se superposent à quelques centaines de mètres. Certains systèmes utilisent la même lentille pour émet-

tre et recueillir la radiation, ce qui permet d'éviter ce problème.

Le caisson est muni d'un dispositif de chauffage afin d'éviter la formation de condensation sur les surfaces optiques, et de sels dessicants pour y réduire l'humidité. Il est fermé par un couvercle dans lequel sont encastrés des déflecteurs optiques qui barrent le passage à la lumière solaire directe.

Le détecteur mesure les signaux rétrodiffusés à des instants successifs. Ces «créneaux» séquentiels correspondent au plus petit accroissement de hauteur décelable. L'existence d'un seuil de détection rend très faible la probabilité que l'instrument ne «voit» pas un nuage existant ou en «voit» un inexistant.

15.4.1.2 Exposition et installation de l'équipement

L'équipement doit être installé de préférence sur une base plane et ferme d'où la vue est parfaitement dégagée vers le haut à l'intérieur d'un cône d'environ 30°. On peut au besoin choisir le toit d'un immeuble à condition d'appliquer aux hauteurs mesurées les corrections voulues pour tenir compte de l'écart avec le niveau du sol. Bien que les télémètres laser utilisés en exploitation soient conçus de manière à ne présenter aucun danger pour l'œil, il convient de veiller à ce que celui d'un observateur inaverti ne se trouve jamais dans la trajectoire directe du faisceau émis.

Afin d'atténuer les effets d'une réflexion trop importante des gouttes de pluie, le faisceau et le télescope peuvent être alignés sur un axe d'environ 5° par rapport à la verticale.

15.4.1.3 Sources d'erreurs

Les principales sources d'erreurs sont les suivantes :

- Mauvaise détermination de la distance due à une défaillance des circuits de l'oscillateur chronométrique principal: ces erreurs sont négligeables dans les conditions d'exploitation normales.
- Verticalité insuffisante des faisceaux émis et reçus : ces erreurs sont négligeables tant que l'alignement entre l'instrument et le faisceau accuse un écart inférieur à 5° par rapport à la verticale.
- Système de traitement des signaux: parce que la base des nuages est en général diffuse et varie grandement dans l'espace et dans le temps, on a mis au point des algorithmes complexes afin d'en obtenir une estimation représentative à partir du signal renvoyé par le nuage. Le brouillard (surmonté ou non de nuages) et les précipitations pouvant engendrer de graves erreurs, il est important de connaître les conditions de visibilité et de précipitations pour ap-

précier la valeur des informations fournies par le télémètre. Lorsqu'il s'agit de nuages stratiformes bien définis (des stratocumulus bas par exemple), les erreurs de mesure ne dépendent que des algorithmes dits de «seuil» et peuvent être considérées comme homogènes pour les télémètres d'un même modèle.

- (d) Plage de mesure: si la puissance disponible du laser est limitée, le rayonnement réfléchi en altitude peut avoir une intensité trop faible pour être détecté. Ainsi, la hauteur de la base des nuages de type cirrus ne peut pas toujours être observée.

En exploitation et si la base des nuages est uniforme, on peut comparer régulièrement les mesures des télémètre laser à celles faites au moyen de ballons-pilotes, à partir d'aéronefs et, la nuit, avec des projecteurs à nuages. De nombreuses comparaisons de télémètre lasers de différents fabricants ont été réalisées, par exemple lors de la comparaison internationale OMM de télémètres (Jones et al., 1988), où l'on a confronté les mesures de différents modèles non seulement entre elles, mais aussi à celles effectuées par des télémètres à faisceau tournant (RBC) et des ballons pilotes. La comparaison internationale a révélé qu'avec l'application de techniques modernes, les télémètres l'emportaient en exactitude, fiabilité et efficacité sur tous les autres moyens actuellement disponibles pour mesurer la hauteur de la base des nuages depuis le sol.

15.4.1.4 Étalonnage et maintenance

La plupart de télémètres laser comportent un dispositif intégré de diagnostic qui contrôle la puissance du signal émis et prévient des graves erreurs de chronométrage. L'étalonnage se borne le plus souvent à vérifier la fréquence et la stabilité de l'oscillateur principal par comparaison avec des étalons extérieurs d'excellente qualité et à vérifier la puissance des sorties de l'émetteur. L'étalonnage peut aussi être réalisé par comparaison (Jones et al. 1988). Le télémètre peut également être pointé sur une cible située à une distance connue (par exemple une tour) afin de confirmer la mesure de la distance réalisée par l'instrument. L'entretien courant consiste à nettoyer les éléments optiques exposés et les panneaux extérieurs et à remplacer les filtres à air des ventilateurs si l'équipement en est pourvu.

15.4.2 Au moyen d'un célosmètre à faisceau tournant

15.4.2.1 Méthode de mesure

Le fonctionnement du télémètre à faisceau tournant (CFT) repose sur la mesure de l'élévation angulaire d'un faisceau lumineux à balayage vertical au mo-

ment où une cellule photoélectrique pointée verticalement vers le haut à une distance connue du projecteur reçoit une fraction de la lumière rétrodiffusée par la base du nuage (figure 15.2). L'équipement se compose d'un émetteur, d'un récepteur et d'un enregistreur.

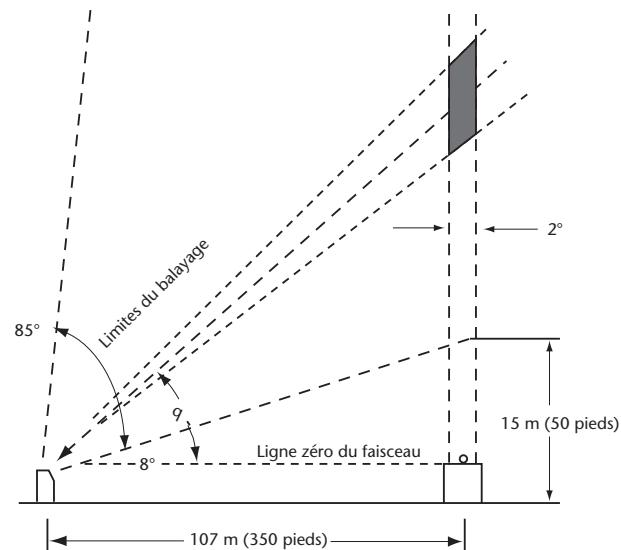


Figure 15.2. Principe du télémètre à faisceau tournant

L'émetteur émet un faisceau lumineux étroit (divergence d'environ 2°) au rayonnement presque entièrement compris dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, c'est-à-dire entre 1 et 3 µm. La longueur d'onde utilisée est donc petite comparativement à la dimension des gouttelettes d'eau présentes dans les nuages. Le faisceau balaie à la verticale un arc de cercle qui va ordinairement de 8 à 85° et on le module à environ 1 kHz de manière à améliorer le rapport signal/bruit au niveau du récepteur en appliquant des méthodes de détection par variations de phase.

Le récepteur comprend une cellule photoélectrique et un limiteur de champ; celui-ci empêche la cellule de capter toute autre lumière que celle réémise à son aplomb. Dans l'enregistreur, une plume se déplaçant simultanément avec le faisceau de l'émetteur trace une marque lorsque la cellule photoélectrique reçoit de la lumière rétrodiffusée par le nuage.

15.4.2.2 Exposition et installation de l'équipement

L'émetteur et le récepteur doivent être installés sur un terrain plat bien dégagé, à un intervalle de 100 à 300 m, et fixés solidement sur des socles stables. Il est crucial que tous deux explorent dans le même plan; on s'en assure en alignant soigneusement leurs optiques et en vérifiant le plan de l'émetteur dans des conditions nocturnes appropriées.

15.4.2.3 Sources d'erreurs

Les erreurs affectant les mesures par CFT de la hauteur de la base des nuages sont essentiellement imputables aux facteurs suivants :

- (a) Largeur du faisceau ;
- (b) Mauvais alignement des optiques ;
- (c) Jeu excessif dans les parties mobiles ;
- (d) Réaction du récepteur.

Parce qu'avec la plupart des modèles le volume du cône d'intersection entre l'émetteur et le récepteur devient très important quand la hauteur du nuage dépasse 500 m, les erreurs dues à la largeur du faisceau sont généralement les plus graves. La définition de la base des nuages donnée à la section 15.1.1 ne constituant pas une assise convenable pour la conception pratique des célosmètres, les algorithmes actuellement utilisés décourent de résultats expérimentaux et de comparaisons avec d'autres méthodes d'estimation. Avec certains CFT, on fait appel à une technique dite de «seuil» pour déterminer la présence de nuages, avec d'autres à la détection d'un signal «de pointe». Dans les deux cas, la sensibilité du récepteur affecte les hauteurs mesurées et engendre dans certaines conditions des erreurs supérieures à celles considérées comme admissibles dans l'énoncé des exigences opérationnelles (Douglas et Offiler 1978). Ces erreurs s'accroissent ordinairement avec la hauteur indiquée.

Les CFT sont extrêmement sensibles à l'action des précipitations. Lorsque celles-ci sont modérées ou fortes, l'instrument signale parfois à tort la présence de nuages bas ou ne détectent plus aucun nuage. Le brouillard peut quant à lui dissiper le faisceau lumineux à proximité du sol, de telle sorte que le célosmètre ne fournit plus aucune indication utile même en présence d'une couche de nuages bas.

Des CFT et des célosmètres laser ont fait l'objet de comparaisons dont les résultats ont été largement diffusés (Jones et al., OMM/TD-N° 217). Ces comparaisons ont montré que leurs indications concordaient jusqu'à des hauteurs voisines de 500 m, mais que les précipitations amoindrissaient nettement l'efficacité des CFT en matière de détection.

15.4.2.4 Étalonnage et maintenance

Les seules opérations d'entretien incomptant normalement à l'utilisateur sont le nettoyage des vitres de l'émetteur et du récepteur et le remplacement des diaphragmes. Les parties extérieures des fenêtres en plastique des deux équipements devraient être nettoyées chaque semaine, avec un chiffon doux et sec, en prenant bien garde de ne pas les rayer. L'alignement optique demande à être vérifié après

tout changement de l'ampoule de l'émetteur. Le niveling de l'émetteur et du récepteur doivent idéalement être contrôlés environ une fois par an et ajustés si cela se révèle nécessaire.

15.4.3 Au moyen d'un projecteur

15.4.3.1 Méthode de mesure

Dans cette méthode, illustrée par la Figure 15.3, on mesure avec une alidade située à un point distant l'élévation angulaire E de la tache lumineuse formée sur la base du nuage par le faisceau d'un projecteur pointé verticalement. Si L est la distance horizontale connue, exprimée en mètres (ou pieds) entre le projecteur et le poste d'observation, l'équation suivante permet d'obtenir la hauteur h en mètres (ou pieds) de la base des nuages au-dessus du point d'observation :

$$h = L \tan E \quad (15.2)$$

La distance optimale entre le projecteur et le poste d'observation avoisine 300 m (1 000 pieds). Si elle est beaucoup plus grande, la tache lumineuse sera peu visible; si elle est beaucoup plus courte, la mesure des hauteurs supérieures à environ 600 m (2 000 pieds) sera moins exacte. Une distance de 250 à 550 m (800 à 1 800 pieds) est généralement acceptable.

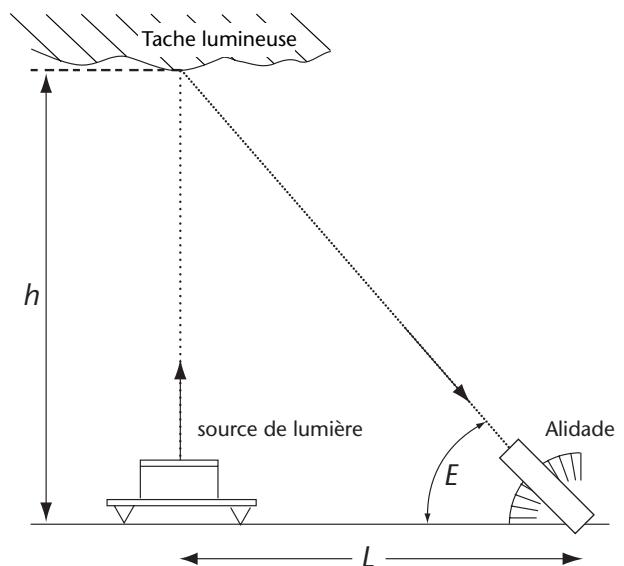


Figure 15.3.
Principe de la méthode du projecteur à nuages

15.4.3.2 Exposition et installation de l'équipement

Il est souhaitable que la ligne de vision soit bien dégagée entre le projecteur et l'alidade, qui doi-

vent tous deux être fixés solidement sur un socle stable. Quand ils ne sont pas au même niveau, il faut appliquer une correction appropriée aux hauteurs calculées. Si la ligne de vision ne peut pas être totalement dégagée entre le projecteur et l'alidade, aucune obstruction ne doit excéder 30 m (100 pieds) de hauteur.

15.4.3.3 Sources d'erreurs

La plus importante source d'erreurs est l'incertitude entachant la mesure de l'élévation angulaire. Les erreurs de hauteur dues à de petites erreurs de verticalité sont insignifiantes.

La valeur de l'erreur absolue Δh de la hauteur calculée du nuage, engendrée par l'erreur ΔE de la mesure de l'élévation angulaire, est donnée par l'équation suivante (on admet que L est une constante mesurée correctement) :

$$\Delta h = L \cdot (1/\cos^2 E) \cdot \Delta E = L \sec^2 E \cdot \Delta E \quad (15.3)$$

où E est exprimé en radians ($1^\circ = \pi/180$ rad). Il est à noter que Δh tend vers l'infini quand $E \rightarrow 90^\circ$. Si $L = 300$ m (1 000 pieds) et $\Delta E = 1^\circ$, la valeur de Δh est de 6 m (17 pieds) quand $h = 300$ m (1 000 pieds), et Δh est d'environ 140 m (450 pieds) quand $h = 1\ 500$ m (5 000 pieds). L'erreur proportionnelle dans h est donnée par :

$$\Delta h/h = 1/(\sin E \cdot \cos E) \cdot \Delta E \quad (15.4)$$

où E est exprimé en radians. $\Delta h/h$ est minimale quand $E = 45^\circ$ (ou $h = L$).

15.4.3.4 Étalonnage et maintenance

Il faut autant que possible vérifier une fois par mois la focalisation et la verticalité du faisceau parce que le filament de l'ampoule subit de légers changements au fil du temps. Lorsque l'ampoule a été remplacée, il faudrait également en ajuster la position car les ampoules ne sont pas toutes identiques.

Il faudrait vérifier la verticalité du faisceau lumineux à l'aide d'un théodolite pendant une nuit très nuageuse, ceci en se plaçant successivement à deux endroits: l'un proche de l'alidade, l'autre approximativement à la même distance du projecteur dans une direction perpendiculaire à la ligne idéale reliant le projecteur à l'alidade (Figure 15.4). On devrait mesurer le plus exactement possible les azimuts du projecteur et de la tache lumineuse sur le nuage, ainsi que l'élévation angulaire de cette dernière. Si la différence entre les azimuts relevés est A et l'élévation angulaire de la tache lumineuse est E , l'écart Φ du faisceau par rapport à la verticale est donné par l'expression suivante :

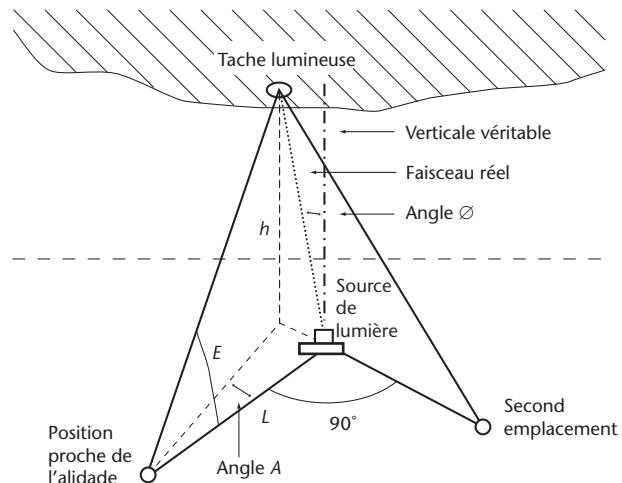


Figure 15.4. Vérification de la verticalité du faisceau émis par le projecteur

$$\Phi = \arctan(\tan A / \tan E) \approx A / \tan E \quad (15.5)$$

(où $A \approx 1^\circ$ ou moins)

Lorsque la valeur de Φ dépasse 1° mesurée depuis l'alidade ou $0,5^\circ$ mesurée depuis l'autre emplacement, il faudrait répéter les ajustements jusqu'à l'obtention de l'exactitude requise.

On peut vérifier la focalisation du faisceau en observant pendant une nuit très couverte le diamètre de la tache lumineuse sur le nuage le plus élevé au-dessus de l'instrument. Si cela se révèle nécessaire, on effectuera les réglages voulus pour réduire ce diamètre au minimum.

15.4.4 Au moyen d'un ballon

15.4.4.1 Méthode de mesure

On peut mesurer de jour la hauteur des nuages en déterminant le temps que met un petit ballon en caoutchouc gonflé à l'hydrogène ou à l'hélium pour aller du sol jusqu'à la base du nuage. On considère que la base du nuage est atteinte lorsque le ballon semble entrer dans une couche de brume avant de disparaître complètement.

La vitesse ascensionnelle du ballon est essentiellement fonction de sa force ascensionnelle nette et se règle en ajustant la quantité d'hydrogène ou d'hélium qu'on y insuffle. La durée du parcours entre le lâcher du ballon et son entrée dans le nuage se mesure avec un chronomètre à poussoir. Si la vitesse ascensionnelle est n par minute et la durée du parcours t minutes, la hauteur du nuage au-dessus du sol est $n \cdot t$ mètres, mais il ne faut pas suivre cette règle aveuglément. Il arrive en effet

que des tourbillons empêchent localement le ballon de s'élever pendant un certain laps de temps après son lancement. On déclenche normalement le chronomètre au moment du lâcher et il faut donc, avant de calculer la hauteur du nuage, soustraire de la durée totale du parcours le temps écoulé entre le lâcher et l'instant où l'on constate que le ballon sort des tourbillons. En l'absence de tourbillons, la vitesse ascensionnelle varie beaucoup au cours des quelque 600 premiers mètres (2 000 pieds) de la montée.

Bien que les données sur la hauteur de la base des nuages de moyenne altitude soient parfois le sous-produit de mesures du vent en altitude par ballon-pilote, la méthode du ballon s'applique principalement aux nuages bas. Si l'observateur ne dispose pas d'accessoires optiques – jumelles, télescope ou théodolite – il devrait renoncer, sauf si le vent est très léger, à mesurer la hauteur de la base d'un nuage dont il juge le niveau supérieur à environ 900 m (3 000 pieds). Par vent fort, un ballon suivi uniquement à l'œil nu risque de sortir du champ de vision avant de pénétrer dans le nuage.

Les précipitations ralentissent la vitesse ascensionnelle des ballons et il ne faudrait tenter de mesurer la hauteur des nuages par ballon-pilote que quand elles sont faibles.

Cette méthode peut être utilisée de nuit en accrochant au ballon une lampe électrique. Pour des raisons de sécurité, l'emploi d'une lanterne abritant une bougie est vivement déconseillé.

15.4.4.2 Sources d'erreurs

Il convient d'utiliser avec précaution cette méthode pour mesurer la hauteur de la base des nuages car la vitesse ascensionnelle moyenne d'un ballon, surtout dans les premières centaines de mètres, peut différer sensiblement de celle prévue en raison des effets produits par les courants vitaux, la forme du ballon, les précipitations et la turbulence.

15.5

MESURE DU TYPE DES NUAGES AU MOYEN D'INSTRUMENTS

L'observation du type des nuages est encore largement réalisée par des observateurs humains. Il n'existe à l'heure actuelle qu'une seule méthode d'observation automatique du type des nuages, qui sert spécifiquement à détecter les CB/TCU (cumulonimbus/cumulus bourgeonnant). Dans cette méthode, on a recours aux données d'un réseau de radars de mesure des précipitations et de détection de la foudre. Les données sur les classes de réflectivité radar et le nombre d'éclairs dans une zone donnée sont combinées afin d'en déduire des informations sur la présence de CB et/ou de TCU.

Il s'agit d'une méthode nouvelle, employée par quelques Services météorologiques. Le taux de fausses alertes est relativement élevé (Leroy, 2006).

15.6

AUTRES PROPRIÉTÉS LIÉES AUX NUAGES

15.6.1

Visibilité verticale

On entend par visibilité verticale la distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé directement à sa verticale. On peut la calculer à partir du profil d'atténuation de l'atmosphère (Manuel du Système mondial d'observation, OMM-N° 544). Certains télémètres (cf. 15.4.1, Hauteur de la base des nuages) fournissent une estimation de la visibilité verticale fondée sur la variation selon la distance de la quantité totale d'énergie réfléchie. Lors de la comparaison internationale OMM de télémètres (Jones et al., 1988), il a été démontré que les résultats que donne cette méthode sont souvent peu fiables. En pratique, un télémètre donne souvent des informations de visibilité verticale quand les conditions de mesure de la base des nuages ne sont pas réunies mais que la lumière réfléchie est reçue d'une certaine altitude.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Douglas, H. A. et Offiler, D., 1978 : The Mk 3 cloud base recorder: A report on some of the potential accuracy limitations of this instrument. *Meteorological Magazine*, 107, p. 23–32.
- Larsson, B. et Esbjörn, E., 1995 : *Cloud Cover Algorithm*. SMHI IO-BN 1995-01-11, SMHI, Norrköping, Suède.
- Leroy, M. et al., *Status of the automatic observation on aerodrome and ongoing improvements in France*, Document présenté à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation météorologique et environnementale (TECO) 2006, Genève, Suisse, WMO-IOM-94, WMO-TD. No. 1354.
- Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA), 1988 : *Federal Standard Algorithms for Automated Weather Observing Systems Used for Aviation Purposes*. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, United States Department of Commerce, FCM-S5-1988, Silver Spring, Maryland, États-Unis.
- Gouvernement des États-Unis, 1999 : *Automated Surface Observing System*. Air Force Operational Test and Evaluation Center: Final Assessment Report for the Federal Aviation Administration, Californie, États-Unis.
- Wauben, W. M. F., 2002 : *Automation of visual observations at KNMI: (II) Comparison of automated cloud reports with routine visual observations*. In: *Symposium on Observations, Data Assimilation and Probabilistic Prediction*. AMS Annual Meeting, 2002 Report, Orlando, Floride, États-Unis.
- Wauben, W., Klein Baltink, H., de Haij, M., Maat, N. et The, H., *Status, evaluation and new developments of the automated cloud observations in The Netherlands*, Document présenté à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation météorologique et environnementale (TECO) 2006, Genève, Suisse, WMO-IOM-94, WMO/TD-No. 1354.
- Organisation météorologique mondiale, 1975 : *Atlas international des nuages: manuel de l'observation des nuages et des autres météores*. Volume I, OMM-N° 407, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1987 : *Atlas international des nuages*. Volume II, OMM-N° 407, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : *WMO International Ceilometer Intercomparison* (Jones, D. W., Ouldridge, M. et Painting, D. J.). Rapport N° 32 sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques, WMO/TD-No. 217, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990 : *Guide des systèmes d'observation et de diffusion de l'information météorologique aux aérodromes*. OMM-N° 731, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel des codes*. OMM-N° 306, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel du Système mondial d'observation*. Volume I, OMM-N° 544, Genève.

CHAPITRE 16

MESURE DE L'OZONE

16.1

GÉNÉRALITÉS

L'ozone est une molécule composée de trois atomes d'oxygène qui se forme naturellement par photolyse de l'oxygène moléculaire, sous l'action du rayonnement solaire ultraviolet à des longueurs d'onde inférieures à 242,5 nm dans la stratosphère. Une certaine quantité d'ozone est également produite dans la troposphère suite à des réactions chimiques faisant intervenir des hydrocarbures et des gaz contenant de l'azote. Même s'il est peu présent dans l'atmosphère, avec une concentration moyenne d'environ trois parties par million (ppmv), les propriétés radiatives de ce gaz à effet de serre font qu'il contribue de manière notable au bilan radiatif de l'atmosphère et régule sensiblement le rayonnement solaire ultraviolet parvenant à la surface de la Terre. L'ozone se trouve surtout (90 pour cent) dans la stratosphère, atteignant une concentration maximale dans la couche 17-25 km (voir la figure 16.1), selon la latitude et la saison, où sa présence cause une inversion de température stratosphérique ainsi qu'un maximum de température à la stratopause. Outre ses propriétés radiatives, ce gaz réagit en présence d'une multitude d'autres constituants atmosphériques à l'état de traces, dont certains sont d'origine anthropique. Les distributions géographique et verticale de l'ozone dans l'atmosphère sont le résultat d'une interaction complexe entre la dynamique atmosphérique et la photochimie.

Il est important de surveiller la concentration de l'ozone près du sol car l'ozone est le produit de la pollution industrielle et urbaine. On se sert donc des mesures d'ozone dans la troposphère et la stratosphère pour valider les modèles qui simulent la photochimie ou la circulation générale de l'atmosphère réelle. On mesure aussi l'ozone dans le but de déterminer le degré d'appauvrissement de la couche d'ozone par les gaz d'origine anthropique, afin de valider les résultats des modèles sur l'évolution de l'ozone et de confirmer la bonne application du Protocole de Montréal (et de ses amendements successifs) relatif aux substances qui détruisent la couche d'ozone. La surveillance de la couche d'ozone nécessite des mesures de qualité sur le long terme par le biais de stations disposant d'instruments correctement entretenus, ce qui est indispensable pour une analyse fiable des tendances.

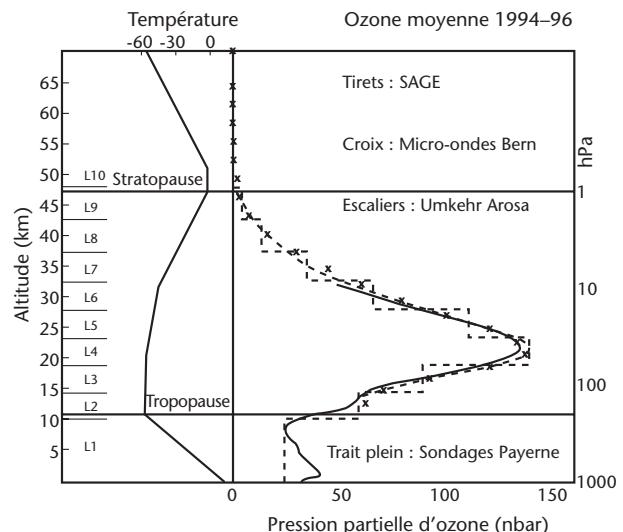


Figure 16.1. Exemple de distribution moyenne sur la verticale d'ozone dans l'atmosphère au-dessus de la Suisse et application de différentes techniques de mesure (J. Staehelin, ETH, Zurich).

16.1.1 Définitions

Trois données essentielles sur l'ozone atmosphérique sont mesurées et transmises régulièrement par les systèmes d'observation au sol et spatial, à savoir :

- L'ozone de surface ;
- L'ozone total ou colonne totale d'ozone ;
- Le profil vertical d'ozone.

L'ozone de surface est la concentration d'ozone local à quelques mètres au-dessus du sol, à un point donné du globe. Les valeurs correspondantes sont généralement exprimées en unités de pression partielle ou en rapport de mélange (massique ou volumique).

L'ozone total correspond à la quantité totale d'ozone contenue dans une colonne verticale de l'atmosphère au-dessus du sol, soit de la surface de la Terre jusqu'au sommet de l'atmosphère. Les unités les plus couramment employées pour exprimer cette valeur sont : a) l'épaisseur de la colonne d'ozone pur à température et pression normales (TPN) et b) la densité de colonne verticale (nombre de molécules par unité de surface).

Le profil vertical d'ozone donne la concentration d'ozone en fonction de l'altitude ou de la pression ambiante. La quantité d'ozone présente à chaque hauteur ou niveau de pression de l'atmosphère est communément exprimée sous forme de pression

¹ Voir <http://ozone.unep.org/pdfs/Montreal-Protocol-Booklet-fr.doc>

partielle, de rapport de mélange ou de concentration locale (nombre de molécules par unité de volume). L'intégrale du profil d'ozone, du sol jusqu'au sommet de l'atmosphère, forme la colonne totale d'ozone.

Voici la définition de quelques termes qui reviennent fréquemment dans ce domaine :

- **Aérosols** : Particules solides, liquides ou à la fois solides et liquides en suspension dans un milieu gazeux.

- **Masse d'air optique relative** : Rapport entre la masse d'air le long du trajet optique du rayonnement solaire dans l'atmosphère (ou à travers une couche) et la masse d'air dans le plan vertical.

- **Unité Dobson (UD)** : Mesure de l'ozone total correspondant à une épaisseur de 10^{-5} m (0,01 mm) d'ozone pur à température et pression normales (unité couramment employée mais n'appartenant pas au Système international d'unités).

- **Milli-atmo-centimètre (m-atm-cm)** : Mesure de l'ozone total équivalant à 10^{-3} cm d'ozone pur à température et pression normales (1 milli-atmo-centimètre est égal à une unité Dobson).

- **Ozone** : Forme allotropique de l'oxygène, gaz bleu instable et puissant oxydant. Il absorbe préférentiellement le rayonnement dans les bandes 100-340 et 550-650 nm du spectre solaire et à 4 700 (4,7 μm), 9 600 (9,6 μm) et 14 100 nm (14,1 μm) dans l'infrarouge.

- **Spectrophotomètre** : Appareil permettant de produire un spectre et de mesurer la luminance spectrale aux longueurs d'onde choisies.

- **Ultraviolet (UV)** : Rayonnement électromagnétique situé entre 100 et 400 nm, que l'on peut diviser en UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) et UV-C (100-280 nm).

- **Effet Umkehr** : Effet optique apparaissant au voisinage du lever et du coucher du Soleil lorsque l'intensité relative du ciel au zénith augmente avec l'accroissement de l'angle zénithal solaire (ou distance zénithale solaire). En prenant une série de mesures zénithales au moyen d'un spectrophotomètre à différentes longueurs d'onde UV, il est possible de déduire la répartition verticale de l'ozone. Ces mesures au sol ne sont effectuées que par temps clair.

16.1.2 Unités et échelles

Une description complète des unités de mesure figure à l'annexe 16.A. Le tableau 16.1 ci-après en donne un bref aperçu.

Tableau 16.1.
Récapitulation des unités et échelles employées

Ozone local	Unités	Colonne d'ozone	Unités
Pression partielle	Millipascal	Ozone total	m-atm-cm $10^{-3} \text{ cm ozone à TPN (UD)}$
Rapport de mélange massique	$\mu\text{g g}^{-1}$		
Rapport de mélange volumique	ppmv		
Concentration locale	Molécules cm^{-3} Molécules m^{-3}	Densité de colonne	m-atm-cm km^{-1}
Densité locale	g m^{-3} $\mu\text{g cm}^{-3}$		

Notes : En l'honneur des travaux précurseurs menés par G.M.B. Dobson, l'unité de colonne totale d'ozone (ozone total), le milli-atmo-centimètre (m-atm-cm), peut être également appelé unité Dobson (UD). Un Dobson est la quantité d'ozone dans la colonne verticale qui, ramenée à une température de 0 °C et à une pression de 101 325 Pa, occupe une épaisseur de 10^{-5} m.

16.1.3 Méthodes de mesure

On mesure la quantité d'ozone atmosphérique par des techniques soit de télédétection soit de mesure in situ. La mesure in situ consiste à déterminer la teneur en ozone d'un échantillon d'air par des procédés optiques, chimiques ou électrochimiques. Les techniques de télédétection, quant à elles, font appel à l'absorption différentielle. En effet, l'ozone présente un spectre d'absorption marqué et variable aux longueurs d'onde ultraviolettes (UV) inférieures à 340 nm, une large crête d'absorption plus faible centrée sur 600 nm dans le visible, ainsi que de nombreuses raies d'absorption et d'émission thermique dans l'infrarouge (IR) et le micro-onde (hyperfréquences). En mesurant l'énergie spectrale produite par une source naturelle (Soleil) ou artificielle après la traversée de l'ozone atmosphérique, il est possible de déterminer l'ozone présent le long du chemin optique. Le rayonnement thermique émis par l'ozone atmosphérique est également mesuré et utilisé pour déterminer les quantités d'ozone.

Une erreur dans les valeurs du spectre d'absorption de l'ozone peut affecter l'exactitude de presque toutes les mesures de l'ozone faites de manière routinière. En effet, le coefficient d'absorption (α) à la longueur d'onde utilisée (voir les équations 16.1 et 16.2) est la référence absolue pour toutes les mesures de l'ozone de surface et de l'ozone total par des instruments au sol. Les valeurs du profil de l'ozone obtenues par la méthode Umkehr et par sondage sont normalisées en fonction d'une

mesure quasi coïncidente de l'ozone total avec des instruments au sol. Enfin, les coefficients d'absorption sont utilisés par les algorithmes d'inversion qui servent à estimer l'ozone total et le profil de l'ozone à partir des données obtenues par Lidar et par satellite.

Plusieurs équipes de chercheurs ont déployé d'importants efforts pour analyser en laboratoire le spectre d'absorption de l'ozone. Elles ont procédé à des mesures sur une vaste plage de températures car l'absorption dépend étroitement de cette dernière variable. Sur recommandation (Megie, Miller et Bojkov, 1991) de la Commission internationale de l'ozone relevant de l'Association internationale de météorologie et de physique de l'atmosphère (AIMPA) (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd>), l'OMM a adopté le 1^{er} janvier 1992 un spectre étalon fondé sur les mesures de Bass et Paur (1985). Ce spectre d'absorption a remplacé les coefficients d'absorption de l'ozone de Vigroux (AIMPA, 1967). Comme les spectres d'absorption sont tributaires de la température, on a procédé à d'autres analyses, notamment Molina et Molina (1986), Brion et al. (1993) et Burrows et al. (1999), afin de mesurer plus précisément cette dépendance. Il convient d'utiliser le même spectre d'absorption si l'on veut comparer des observations de l'ozone effectuées avec différents instruments. Il existe d'autres sources d'erreur, propres à la valeur mesurée et à la méthode employée, comme cela est expliqué après.

16.2 MESURES DE L'OZONE EN SURFACE

16.2.1 Instruments servant à mesurer l'ozone de surface

Les mesures courantes se font au moyen d'analyseurs d'ozone qui donnent la concentration in situ dans l'air ambiant. Les instruments les plus employés sont les analyseurs d'ozone photométriques dans l'ultraviolet. Ces appareils fonctionnent selon le principe de la photométrie d'absorption dans l'ultraviolet, à l'intérieur d'un faible intervalle de longueurs d'onde (0,5 à 1 nm) à 254 nm. Les analyseurs par voie sèche, qui utilisent les techniques chimiluminescentes, et les analyseurs par voie humide, ont été beaucoup utilisés, mais ils tendent à être remplacés par des appareils plus fiables faisant appel à la méthode d'absorption UV. La photométrie d'absorption dans l'ultraviolet est la technique recommandée par le Groupe consultatif scientifique sur les gaz réactifs, relevant de la Veille de l'atmosphère globale (VAG/OMM). Paur et McElroy (1979) donnent des renseignements techniques sur les instruments de mesure de l'ozone ambiant. Attmanns-

pacher et Hartmannsgruber (1982) et Klausen et al. (2003) ont procédé à des comparaisons des appareils de mesure de l'ozone de surface.

16.2.2 Mesure photométrique de l'ozone de surface dans l'ultraviolet

L'ozone de surface est principalement mesuré au moyen de techniques in situ, la plus courante faisant appel à la photométrie UV et consistant à prélever un échantillon d'air ambiant et à l'aspirer dans une cellule afin de mesurer l'absorption des rayons UV à la raie d'émission de 254 nm produite par une lampe à vapeur de mercure. Étant donné les fortes propriétés absorbantes de l'ozone à cette longueur d'onde, on obtient une mesure en absorption détectable quand l'ozone est présent dans la cellule. La cellule d'absorption reçoit alternativement un échantillon d'air prélevé directement dans l'atmosphère et un échantillon que l'on a fait passer dans un épurateur au dioxyde de manganèse, dans lequel l'ozone a été transformé par catalyse en oxygène tout en maintenant intacts la totalité des autres gaz à l'état de traces et en gardant presque constante l'humidité relative. On peut ainsi évaluer l'intensité du rayonnement UV lorsque l'air ambiant renferme de l'ozone et lorsqu'il n'en renferme pas. La valeur obtenue en présence d'ozone, I , est reliée à la valeur mesurée en l'absence d'ozone, I_0 , par l'expression suivante :

$$I = I_0 \exp (-\alpha CL) \quad (16.1)$$

où α est la section efficace d'absorption de l'ozone à 254 nm (cm^2), C la concentration d'ozone dans la cellule (en molécules cm^{-3}) et L la longueur de la cellule (en cm). En comparant les deux intensités, il est donc possible de calculer la concentration de l'ozone dans la cellule, à condition de connaître la longueur de celle-ci et la section efficace d'absorption de l'ozone. Les valeurs obtenues sont exprimées en parties par milliard en volume (ppbv) ou en unités de pression partielle. La gamme de détectabilité s'étend de 1 à 1 000 ppbv.

16.2.3 Exposition des instruments servant à mesurer l'ozone de surface

Les instruments utilisés pour évaluer in situ la quantité d'ozone de surface sont généralement placés à l'intérieur d'un bâtiment, l'air ambiant étant acheminé jusqu'à l'analyseur par un tube en Teflon propre. Le côté admission du tube est placé de manière à ce que l'air prélevé soit représentatif de l'atmosphère locale. La prise d'air doit se trouver à trois mètres au moins du sol (souvent sur un toit). Elle est inversée pour éviter l'entrée d'eau de pluie et protégée par un goulet pour réduire l'aspiration de grosses particules et de saleté. L'emplacement choisi doit être exempt

de toute source de perturbation dans la composition de l'atmosphère (voie de circulation, cheminée, ventilateur, etc.). Un filtre pour fines particules recouvre l'entrée du tube afin d'empêcher la contamination par les grosses particules et la saleté, filtre qui doit être remplacé régulièrement (environ une fois par semaine, selon les conditions atmosphériques). Le tube d'admission doit toujours être propre et aussi court que possible, afin que l'ozone ne soit pas détruit avant de parvenir à l'instrument de mesure. En général, une longueur de 3 à 5 mètres est acceptable tout en permettant de situer la prise d'air à une hauteur satisfaisante.

Si l'on désire mesurer la quantité d'ozone de fond (sans apport local de polluant), l'emplacement choisi devra se trouver à l'écart des grandes sources de pollution (essentiellement les villes). Les stations devraient satisfaire les critères définis pour les stations régionales ou mondiales de la Veille de l'atmosphère globale (VAG) figurant dans la publication de l'OMM (1988) et adoptés par le Conseil exécutif à sa quarante-quatrième session en juin/juillet 1992 (OMM, 1993).

16.2.4 **Erreurs dans la mesure de l'ozone de surface**

La principale source d'erreur provient de la perte d'ozone le long du tube d'admission et ce, quel que soit l'analyseur d'ozone in situ choisi pour mesurer l'ozone de surface. Cette erreur peut être réduite au minimum en gardant le tube propre et sec.

D'autres gaz à l'état de traces absorbent aussi les rayons à 254 nm de longueur d'onde qui servent à mesurer l'absorption produite par l'ozone. Les méthodes différentielles qui consistent à comparer l'air ambiant renfermant de l'ozone à l'air ambiant exempt d'ozone suppriment ce problème puisque, dans les deux cas, les autres gaz absorbants sont présents dans l'échantillon analysé. Toutefois, si la concentration de l'un de ces gaz changeait entre les deux prélèvements d'air avec et sans ozone, la détermination de la teneur en ozone serait erronée. Le retrait incomplet de l'ozone attribuable au mauvais fonctionnement de l'épurateur peut aussi compromettre la validité des données obtenues.

De manière générale, la quantification de l'ozone par un photomètre UV est assez fidèle car il s'agit d'une mesure relative (où l'on compare les degrés d'absorption dans une cellule renfermant de l'ozone et dans une cellule n'en contenant pas). Le rayonnement émis par la lampe et la sensibilité du capteur peuvent varier sans que cela ne modifie la

mesure de l'absorption. Klausen et al. (2003) ont évalué l'incertitude et les erreurs systématiques qui peuvent entacher les mesures de l'ozone de surface effectuées au moyen de la méthode d'absorption UV.

16.2.5 **Comparaison, étalonnage et maintenance des instruments servant à mesurer l'ozone de surface**

Les instruments photométriques dans l'ultraviolet servent d'étalons primaires. L'étalonnage absolu d'un analyseur photométrique UV dépend de l'exactitude de la valeur de la section efficace d'absorption de l'ozone à 254 nm. On vérifie cette valeur en mesurant l'absorption dans une cellule renfermant une quantité connue d'ozone. Cette quantité est elle-même déterminée par un procédé chimique ou physique qui donne le nombre de molécules d'ozone à l'intérieur de la cellule. Les méthodes employées pour cela comprennent le passage de l'ozone dans une solution d'iodure de potassium, le titrage de l'ozone à l'oxyde nitrique et la mesure de la variation de la pression lors de la transformation d'oxygène en ozone. On estime que l'incertitude de la section efficace est de l'ordre de ± 5 pour cent.

La photométrie UV est jugée suffisamment fiable pour transférer l'étalonnage primaire aux instruments employés sur le terrain. La référence mondiale pour la mesure de l'ozone in situ est le photomètre de référence étalon conservé par le National Institute of Standards and Technology et le Bureau international des poids et mesures. Les étalons de transfert sont étalonnés à l'aide de ce photomètre. On compare ensuite un instrument en service en mesurant un échantillon d'ozone (produit en laboratoire ou prélevé dans l'air ambiant) au moyen de l'instrument et de l'étalon de transfert (Klausen et al., 2003).

16.3 **MESURES DE L'OZONE TOTAL**

16.3.1 **Méthodes employées**

Les mesures se font au moyen d'instruments de télédétection au sol ou embarqués à bord d'un satellite qui détectent le rayonnement dans le spectre d'absorption UV de l'ozone entre 300 et 340 nm. L'ozone total est mesuré au sol par les méthodes du rayonnement solaire direct, du rayonnement lunaire direct et du rayonnement solaire diffus au zénith et, à partir de satellites,

par la méthode du rayonnement ultraviolet rétro-diffusé dans l'espace par l'atmosphère terrestre. La présente section portera sur les techniques utilisées par les instruments au sol. Les observations spatiales seront décrites de manière générale dans la section 16.6, étant donné que les technologies appliquées sont très complexes et associées à des missions particulières.

16.3.2 Instruments servant à mesurer l'ozone total depuis le sol

On peut avoir recours à des instruments de télédétection au sol qui mesurent l'intensité du rayonnement ultraviolet à des longueurs d'onde situées dans le spectre d'absorption de l'ozone, à l'aide de techniques de spectroscopie d'absorption optique différentielle (DOAS). Les spectrophotomètres Dobson (Dobson, 1957; OMM, 1980) et Brewer (Kerr, McElroy et Olafson, 1980; Wardle et al., 1987), ainsi que les ozonomètres à filtre M 124 (Gushchin, Sokolenko et Kovalyev, 1985) sont les appareils au sol les plus couramment employés au sein du réseau d'observation de l'ozone du programme de la VAG de l'OMM. D'autres instruments ont été mis au point mais ils ne servent pas à la surveillance et à l'observation régulières de l'ozone total, leur utilisation étant limitée à des expériences précises.

16.3.2.1 Mesures du rayonnement solaire direct

La méthode la plus exacte et la mieux définie pour déterminer l'ozone total consiste à mesurer le rayonnement solaire direct à partir du sol, à des longueurs d'onde UV allant de 305 à 340 nm. Cette méthode applique la loi de Lambert Beer qui définit l'intensité du rayonnement direct, I_λ , atteignant la surface du globe à une longueur d'onde, λ , après atténuation par certains constituants atmosphériques X_i :

$$I_\lambda = I_{o\lambda} e^{-\sum \alpha_{\lambda i} X_i \mu_i} \quad (16.2)$$

où $I_{o\lambda}$ est une constante désignant la mesure de I_λ que donnerait l'instrument s'il était placé au-dessus de l'atmosphère (la constante extraterrestre), $\alpha_{\lambda i}$ sont les coefficients d'absorption des constituants mesurés en laboratoire et μ_i les rapports entre la masse d'air le long des trajets obliques du faisceau qui traverse les couches d'éléments absorbants/diffuseurs et la masse d'air dans le plan vertical (masses d'air optiques relatives). Si un spectrophotomètre mesure le rayonnement, I_λ , à plusieurs longueurs d'onde, λ_p , et avec des coefficients d'absorption différents, il est possible d'éliminer les effets des autres composants atmosphériques (en particulier les aérosols), par combinaisons linéaires de l'équation 16.2. On peut déterminer une relation générale pour le calcul

de l'ozone total à partir d'observations du rayonnement solaire direct, X_{ds} , (voir l'annexe 16.B) :

$$X_{ds} = \frac{F_o - F - \beta m}{\alpha \mu} \quad (16.3)$$

où F est une fonction de $\log(I_{\lambda_i})$, F_o est une fonction de $\log(I_{o\lambda_i})$, les constantes pour l'instrument, α et β , sont respectivement les coefficients d'absorption et de diffusion différentielles de l'ozone dans l'air pur, μ et m respectivement les masses d'air optiques relatives de la couche d'ozone et de toute l'atmosphère. Dans l'équation 16.3, la valeur F provient de mesures effectuées à l'aide de l'instrument, F_o la constante d'étalonnage du spectrophotomètre, α et β sont des valeurs déterminées en laboratoire, et μ et m sont mesurés au moment et à l'emplacement géographique des mesures réalisées à partir de relations astronomiques. La méthode décrite ici n'est utilisable que pendant les heures de clarté lorsque le rayonnement solaire direct n'est pas entravé par des nuages ou d'autres obstacles pendant une période d'au moins deux minutes (Dobson) ou cinq minutes (Brewer). Les distances zénithales du Soleil convenant aux observations diffèrent selon le type de spectrophotomètre et la longueur d'onde utilisés pour les mesures, mais ne dépassent généralement pas 72° avec les appareils Dobson et M-124 et 75° avec le spectrophotomètre Brewer. Alors que le spectrophotomètre Dobson mesure les rapports relatifs du rayonnement à trois paires de longueurs d'onde (A: 305,5/325,4; C: 311,5/332,4; D: 317,6/339,8 nm), le spectrophotomètre Brewer enregistre le rayonnement (comptage des photons) à cinq longueurs d'onde opérationnelles (306,3, 310,1, 313,5, 316,8 et 320,1 nm). L'ozonomètre à filtre M-124, quant à lui, effectue les mesures à 302 et 326 nm, avec un passe bande spectral de 20 nm. Pour obtenir de plus amples informations sur la modification de la relation (équation 16.3) en fonction des différents types d'instruments et de leur utilisation pour le traitement des observations de l'ozone total, on se reportera aux références de la section 16.3.2 ou à la publication pertinente de la VAG (OMM, 2003).

Le spectrophotomètre Brewer mesure le rayonnement UV à plusieurs longueurs d'onde, ce qui permet de calculer la quantité totale de dioxyde de soufre dans la colonne totale d'atmosphère à l'aide d'une équation semblable à l'équation 16.3. L'équation relevante au dioxyde de soufre peut être obtenue au moyen d'autres combinaisons linéaires de coefficients d'absorption et de diffusion différentielles et de rayonnements, I_i . Afin de traiter les mesures du dioxyde de soufre total, il convient de définir une constante extraterrestre pour ce composant lors de l'étalonnage de l'instrument.

16.3.2.2 Mesures du rayonnement lunaire direct

La quantité d'ozone total est également mesurée par le rayonnement lunaire direct, en utilisant le rayonnement solaire réfléchi par la lune comme source de rayonnement UV. Cette technique, fondée sur le même principe que la précédente, n'est pas aussi exacte en raison de la quantité moindre de rayons UV et des difficultés que posent les observations. Il est impossible d'obtenir une couverture quotidienne complète car la période de mesure est limitée à cinq jours précédent et suivant la pleine Lune. En outre, les rayons ne doivent pas traverser de nuages et la distance zénithale apparente de la Lune doit être inférieure à 75°. La méthode du rayonnement lunaire direct est cependant très utile pendant la nuit polaire, mais elle n'est pas beaucoup employée aux stations de la VAG.

16.3.2.3 Mesures du rayonnement solaire diffus au zénith

Cette méthode a été mise au point afin de pouvoir mesurer l'ozone total tous les jours, même sous une couverture nuageuse. On sait de manière empirique que les UV diffusés vers la Terre par le ciel au zénith renferment suffisamment d'informations pour permettre une évaluation raisonnable de l'ozone total. L'intensité relative des rayons UV à deux longueurs d'onde est fonction de la quantité d'ozone total et de la valeur μ . À partir de nombreuses séries d'observations (quelques centaines) quasi simultanées du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus au zénith, on peut se servir des valeurs d'ozone total obtenues avec le rayonnement solaire direct pour établir des fonctions de régression empiriques $f(F,\mu)$ qui permettent de calculer les valeurs d'ozone total par rayonnement diffus au zénith X_{zs} , comme suit :

$$X_{zs} = f(F,\mu) \quad (16.4)$$

Les fonctions statistiques $f(F,\mu)$ sont définies comme des polynômes multi-régression (polynômes zénithaux), qui remplacent les tableaux manuels précédemment employés. Les mesures du rayonnement solaire diffus au zénith sont limitées aux heures de clarté, lorsque le Soleil se trouve à un distance zénithale égale ou inférieure à 80°. Leur exactitude n'est pas aussi grande que celle obtenue en mesurant le rayonnement solaire direct car le trajet de la lumière dans l'ozone atmosphérique est plus long et son absorption dépend d'autres variables, comme la répartition verticale de l'ozone et la présence de nuages. Les résultats des observations du rayonnement diffus au zénith sont forcés au niveau des observations du rayonnement solaire direct à long terme par cette méthode. Étant donné que les conditions permet-

tant des observations quasi-simultanées du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus au zénith peuvent donner des quantités différentes d'ozone total que celles obtenues dans les conditions qui permettent uniquement la conduite d'observations du rayonnement solaire diffus au zénith (en particulier par temps nuageux), l'exactitude des résultats découlant des observations du rayonnement au zénith est encore plus réduite.

16.3.3 Implantation des instruments servant à mesurer l'ozone total

Les instruments de télédétection au sol servant à mesurer l'ozone présent dans la stratosphère sont installés en fonction des exigences de visée. Ils sont en principe placés dans un observatoire permettant une vision claire du Soleil et du ciel au zénith. L'emplacement choisi ne doit comporter aucune source locale de polluants ou d'autres contaminants susceptibles de modifier les propriétés optiques de l'atmosphère locale dans la région UV, notamment les aérosols et le dioxyde de soufre. Tous les types de spectrophotomètres doivent être dotés de systèmes externes de séchage ou de systèmes internes de dessiccation afin de garantir que les composants du système optique et des circuits électroniques des instruments demeurent secs en permanence. Il faut veiller à utiliser les spectrophotomètres dans des conditions de température stables, afin d'empêcher que leur sensibilité et leurs réglages ne changent rapidement au cours de la réalisation des mesures. C'est pourquoi les instruments Dobson doivent être recouverts d'une enveloppe isolante.

Les instruments Dobson et M-124 doivent être gardés à l'intérieur et transportés à l'air libre lorsque l'on veut mesurer le rayonnement solaire direct ou le rayonnement diffus au zénith. Cela n'est pas nécessaire dans les observatoires qui comportent une trappe de toit ou une coupole que l'on peut ouvrir pour procéder aux observations. Les spectrophotomètres Brewer entièrement automatiques sont installés à demeure en plein air, dans un site assurant une bonne vision du Soleil au-dessus d'une hauteur de 15° tous les jours de l'année. L'instrument est mis à niveau et dirigé vers le Soleil de manière à assurer un pointage automatique vers cet astre. Chaque spectrophotomètre est également doté d'un système de chauffage interne.

16.3.4 Erreurs dans la mesure de l'ozone total

L'équation 16.3 constitue le fondement physique de la méthode de mesure de l'ozone total à partir du rayonnement solaire direct. Une partie des erreurs survenant avec cette méthode s'explique par les

incertitudes qui entachent les différents termes de l'équation. Pour une description détaillée du spectrophotomètre Dobson, on se reportera à la publication de l'OMM (1982a).

- *Constante extraterrestre F_0*

La constante extraterrestre d'un instrument, F_0 , est la valeur qu'indiquerait cet instrument s'il était exposé au rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre et en l'absence d'ozone. Cette valeur n'est pas mesurée directement mais déterminée soit par un certain nombre d'extrapolations de la masse atmosphérique (étalonnage absolu ou méthode de Langley), soit par étalonnage de l'instrument avec un étalon dont on connaît la constante F_0 (voir les sections 16.3.5.1 et 16.3.5.2). Des erreurs risquent de se produire dans l'évaluation de F_0 en raison de l'incertitude liée à l'étalonnage initial du spectrophotomètre ou par suite d'une variation (dérive graduelle ou brusque changement) des propriétés optiques de l'instrument. Les résultats à long terme des campagnes d'étalonnage montrent que les incertitudes qui entachent l'étalonnage initial (définition de F_0 à partir d'une comparaison avec un étalon au début de la campagne avant toute activité d'observation) donnent généralement lieu à des erreurs de moins de 1,0 pour cent. Si les spectrophotomètres Dobson et Brewer sont entretenus et employés selon les consignes d'utilisation standard (voir la section 16.3.5.2), la dérive de l'exactitude attribuable au vieillissement naturel de l'instrument correspond habituellement à moins de 2,0 pour cent pour une période de quatre ans (Vanicek, 2003; Evans et al, 2004a; Lamb, 2004; Köhler, 2004). En revanche, les brusques changements de l'état technique de l'instrument (dommages, modification de l'alignement optique, détérioration rapide du phototube ou des filtres) peuvent être à l'origine d'erreurs de mesure atteignant 10 pour cent et plus. En outre, la variabilité du spectre énergétique émis par le Soleil est aussi susceptible de provoquer des erreurs, estimées à moins de 0,3 pour cent (OMM, 1982b; 1990). Il est souvent possible de déceler ces variations en procédant à des tests de lampe tous les mois (voir la section 16.3.5.2).

- *Lecture spectrale différentielle F*

Il peut aussi se glisser des erreurs instrumentales dans la lecture de F . Ainsi, la réponse non linéaire de l'appareil constitue une source potentielle d'erreur. Dans le cas des spectrophotomètres Dobson, les irrégularités du coin photométrique provoquent inévitablement un certain degré de non-linéarité. La non-linéarité des spectrophotomètres Brewer est attribuable au temps mort du système de comptage des photons. Ces deux imperfections sont corrigées par des mesures d'étalonnage de la linéarité. En général, l'incertitude n'atteint pas 0,3 pour cent avec les spectrophotomètres Brewer et 0,5 pour cent (OMM,

1982a) avec les spectrophotomètres Dobson. Ces erreurs affectent l'exactitude des valeurs d'ozone obtenues. La valeur F mesurée peut aussi être inexacte à cause de l'incertitude aléatoire (bruit). Cette erreur est en principe inférieure à 0,3 pour cent lorsqu'on mesure de manière classique le rayonnement solaire direct avec les appareils Brewer et Dobson.

- *Masse d'air optique relative de la couche d'ozone μ*

Une autre source d'erreur dans la détermination de l'ozone total vient de la masse d'air optique de la couche d'ozone (μ). Ce chiffre est calculé en fonction de la date et de l'heure de l'observation et de l'emplacement géographique de l'instrument (latitude, longitude, altitude). Une erreur de 1' dans la latitude ou la longitude ou de 10 secondes dans l'heure, à certaines périodes de l'année, peut fausser la valeur μ de 0,1 pour cent. D'autre part, lorsqu'on calcule cette valeur, on suppose que la couche d'ozone est centrée optiquement à 22 km au-dessus de la station.

Un écart de 2 km au niveau de l'altitude peut donner lieu à une erreur de 0,25 pour cent dans la valeur μ et, par conséquent, une erreur de 2 pour cent dans l'ozone total pour $\mu > 3,2$. Afin d'optimiser les mesures, il est recommandé d'appliquer une résolution de 10 secondes pour les lectures F , et le calcul de μ devrait inclure l'approximation géographique de l'altitude de la couche d'ozone. Cela est particulièrement vrai pour les mesures de l'ozone total dans les hautes latitudes, où les observations sont effectuées à des distances zénithales du Soleil faibles.

- *Coefficient d'absorption de l'ozone α*

L'incertitude que comporte le coefficient d'absorption différentielle (α dans l'équation 16.3) découle, pour un instrument donné, de l'inexactitude des fonctions de transmission de la fente. Les spectrophotomètres utilisés dans le réseau mondial de la VAG sont censés avoir les mêmes fonctions de fente que les instruments de référence mondiaux, à condition que les essais de fente donnent des résultats correspondant aux limites définies par les concepteurs d'instrument (Dobson 1957; SIC-TEC, 1993). En réalité, cette hypothèse n'est pas entièrement satisfait et les longueurs d'onde choisies pour les fentes peuvent différer de celles prévues. Dans le cas des spectrophotomètres Dobson, il est très difficile de déterminer les coefficients d'absorption corrects, car l'opération nécessite des analyses et ajustements très complexes en laboratoire. Cela est plus facile avec les spectrophotomètres Brewer, car on peut détermi-

² AD est la différence entre l'absorption aux paires de longueurs d'onde les plus couramment utilisées pour le calcul de l'ozone total, c'est-à-dire (en nm) : A: 305,5/325,4; D: 317,6/339,8

ner les longueurs d'onde et définir les coefficients d'absorption de l'ozone au moyen du «test de dispersion», qui peut être réalisé lors de l'étalonnage régulier à la station. Comme cela a été mentionné à la section 16.1.3, on a adopté, le 1^{er} janvier 1992, la nouvelle série de coefficients d'absorption de l'ozone de Bass Paur comme nouveau barème étalon international. Par ailleurs, les coefficients d'absorption de l'ozone dépendent de la température, ce qui crée une autre source d'erreur. Cela est particulièrement important avec les coefficients d'absorption du spectrophotomètre Dobson, qui ont été définis en fonction d'une température stratosphérique représentative de -46,3 °C (Komhyr, Mateer et Hudson, 1993). Comme la température réelle de la couche d'ozone (déterminée à partir du profil vertical de l'ozone pondéré en fonction du profil vertical de la température) n'est pas stable selon la latitude et la saison, les valeurs des coefficients d'absorption différentielle peuvent fluctuer d'environ 1,2 pour cent par 10 K pour la combinaison de longueurs d'onde de référence AD⁽²⁾ (Kerr, Asbridge et Evans, 1988). Cet effet de la température peut constituer une nouvelle source d'erreur dans l'évaluation de l'ozone total, estimée à 1-1,5 pour cent (Köhler, 1999; Vanicek, Stanek et Dubrovsky, 2003; OMM, 2003). Comme l'appareil Brewer a recours à des paires de longueurs d'onde qui éliminent la dépendance des coefficients d'absorption vis-à-vis de la température de la stratosphère (Kerr, 2002), cet instrument est censé être plus précis que le spectrophotomètre Dobson.

• Aérosols et autres gaz absorbants

L'absorption du rayonnement UV par d'autres gaz atmosphériques peut également influer sur l'exactitude de la mesure de l'ozone total. Le dioxyde de soufre, notamment, est considéré comme une source d'erreurs importantes. Ces dernières se chiffrent habituellement à environ 1 pour cent dans le cas des spectrophotomètres Dobson utilisés à des emplacements non pollués (Kerr, Asbridge et Evans, 1988). Par contre, dans des zones où les émissions de dioxyde de soufre sont élevées ou dans des situations d'inversion, l'effet peut atteindre 10 pour cent de l'ozone dans la colonne (DeMuer et De Backer, 1992; Vanicek, Stanek et Dubrovsky, 2003). Comme cela a été mentionné dans la section 16.3.2.1, le spectrophotomètre Brewer peut mesurer la colonne totale de dioxyde de soufre si la constante extraterrestre a été définie. Ainsi, l'effet du dioxyde de soufre sur l'exactitude des mesures de l'ozone total peut être éliminé. On peut aussi supprimer en grande partie l'incidence des aérosols grâce à la technologie de l'observation du rayonnement solaire direct (voir l'annexe 16.B), leur contribution aux erreurs dans la mesure de l'ozone total étant estimée à moins de 1 pour cent, tout comme les minces bandes de cirrus.

- *Observations du rayonnement solaire diffus au zénith*

Les trois instruments de base utilisés dans le réseau d'observation de l'ozone de la VAG (Dobson, Brewer et filtre M-124) peuvent également déterminer l'ozone total par la mesure du rayonnement solaire diffus au zénith. L'exactitude de ces mesures reposent sur l'étalonnage de l'instrument, sur la qualité des polynômes zénithaux $f(F,\mu)$ dans l'équation 16.4 et sur les conditions réelles du ciel lors de l'observation. Alors que l'opérateur peut déterminer l'état du ciel et avoir recours aux polynômes «ciel dégagé au zénith» ou «ciel nuageux au zénith» quand il utilise manuellement le spectrophotomètre Dobson et les instruments à filtre, les mesures zénithales effectuées à l'aide du spectrophotomètre Brewer ne peuvent être traitées qu'au moyen d'un polynôme général «ciel au zénith». Comme les résultats des mesures zénithales sont forcés pour être identiques aux résultats de la quantification du rayonnement solaire direct à long terme, leur exactitude ne peut, au mieux, qu'être comparable à celle obtenue avec le rayonnement solaire direct.

L'exactitude des observations zénithales est habituellement estimée par comparaison de séries d'observations quasi simultanées du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus au zénith, effectuées au moins toutes les dix minutes. Plusieurs études (DeBacker, 1998; Vanicek, Stanek et Dubrovsky, 2003) ont établi une exactitude de 1,5 pour cent pour les mesures effectuées à l'aide de spectrophotomètres Dobson dans des conditions de ciel dégagé au zénith et d'environ 3 pour cent pour les mesures réalisées avec des ciels nuageux au zénith, selon l'opacité de l'ennuagement. Dans le cas du spectrophotomètre Brewer, les différences par rapport aux valeurs de rayonnement solaire direct sont davantage variables et il est généralement possible d'obtenir une exactitude allant jusqu'à 3 pour cent dans toutes les conditions de ciel sauf lorsque la couche nuageuse est épaisse. L'exactitude des instruments à filtre M-124 est d'environ 4 pour cent avec un ciel dégagé et jusqu'à 6 pour cent pour les observations par temps nuageux, avec une variation beaucoup plus élevée des erreurs systématiques dans les mesures individuelles (Gushchin, Sokolenko et Kovalyev, 1985; Feister, 1991). Les limites d'exactitude mentionnées plus haut nécessitent toutefois l'utilisation de polynômes zénithaux ayant été mis au point pour une station et un instrument donnés, compte tenu du fait que $f(F,\mu)$ sont surtout déterminés par le rayonnement UV diffus externe et interne qui parvient au photodétecteur de l'instrument. Dans les latitudes moyennes et hautes, les polynômes zénithaux dérivés et employés séparément pour les saisons d'été et d'hiver permettent d'obtenir une exactitude améliorée et plus stable (Asbridge, Vanicek et Stanek, 1998).

16.3.5 Comparaison, étalonnage et maintenance des instruments servant à mesurer l'ozone total

16.3.5.1 Étalonnage des instruments servant d'étalon primaire et barèmes d'étalonnage

L'étalonnage d'un instrument de terrain est entièrement relié à un appareil de référence. Pour le spectrophotomètre Dobson, la référence est l'étalon primaire (WPDS No 83) reconnu par l'OMM et conservé par l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA) (Laboratoire de recherche sur le système terrestre (ESRL)/Division de la surveillance mondiale (GMD)) à Boulder, Colorado (Komhyr, Grass et Leonard, 1989). Dans le cas du spectrophotomètre Brewer, la référence est constituée par un ensemble de trois étalons primaires conservés par le Service météorologique du Canada (SMC), autrefois dénommé Service de l'environnement atmosphérique, à Toronto, Canada (Kerr, McElroy et Wardle, 1998). Tous les ozonomètres M-124 en service sont étalonnés par rapport au spectrophotomètre Dobson 108, conservé à l'Observatoire principal de géophysique Voeikov à Saint Pétersbourg, Fédération de Russie (Bojkov, Fioletov et Shalamjansky, 1994). Il importe de souligner que les étalons mondiaux Dobson et Brewer sont utilisés pour l'étalonnage des mêmes types de spectrophotomètres dans le réseau mondial. Ainsi, à la fois l'étalon primaire WPDS No 83 et le trio d'étalons Brewer définissent leurs propres barèmes d'étalonnage qui sont transférés aux instruments des stations (voir la section 16.3.5.2).

Les spectrophotomètres de référence mondiaux sont étalonnés au moyen de la méthode sophistiquée de Langley, parfois dénommée «étalonnage absolu». Cette méthode se fonde sur la détermination de la constante extraterrestre F_0 à partir de l'équation 16.3 qui peut être reformulée ainsi :

$$F + \beta m = F_0 - \alpha X_{DS} \mu \quad (16.5)$$

où α et β sont des constantes. Dans certaines conditions atmosphériques (valeur d'ozone total presque constante, effet négligeable des aérosols atmosphériques, diffusion atmosphérique de Rayleigh stable pour le rayonnement solaire et ciels entièrement dégagés les jours d'observation), on effectue une série d'observations diurnes du rayonnement solaire direct ($F + \beta m$) au moyen de l'instrument étalon à différentes valeurs de μ . Ces observations sont ensuite représentées graphiquement en fonction de μ et un ajustement linéaire aux points de données est extrapolé à $\mu = 0$ afin de déterminer F_0 . L'étalonnage correspond habituellement à une moyenne basée

sur de nombreux jours d'observation, et les équations sont transformées en vue de corriger l'étalonnage existant. Les conditions atmosphériques recherchées ne se trouvent qu'à de rares observatoires dans le monde. C'est pourquoi l'étalonnage absolu des étalons mondiaux Dobson et Brewer est réalisé régulièrement à l'observatoire subtropical de haute altitude de Mauna Loa (NOAA) à Hawaii (19,5°N 155,6°O, à 3 397 m d'altitude). Les analyses de l'étalonnage absolu montrent que l'étalonnage des étalons a maintenu une exactitude d'environ 0,5 pour cent dans les 20 à 25 dernières années (Evans et al., 2004b; Fioletov et al., 2004). Ce comportement à long terme reflète tous les aspects techniques pouvant influer sur l'état d'étalonnage des étalons, à savoir le choix des longueurs d'onde, la sensibilité de photodétection de l'éclairement, les réponses non linéaires des composants électriques, le vieillissement des éléments optiques et la diffusion interne.

16.3.5.2 Transfert et conservation des étalonnages

L'étalonnage absolu des étalons primaires doit être transféré à tous les appareils en service et soigneusement conservé.

La principale méthode employée pour transférer le barème d'étalonnage de l'étalon primaire Dobson à un instrument en service est la méthode du rayonnement solaire direct simultané, qui consiste à effectuer des observations de l'ozone total au même moment et à partir du même emplacement, à la fois avec l'étalon et avec l'appareil de terrain. L'opération doit durer au moins une demi-journée, bénéficier de bonnes conditions d'observation et couvrir une gamme acceptable de valeurs μ (1,15-3,2). La constante extraterrestre de l'instrument en service est ajustée au mieux pour les valeurs de l'ozone total en fonction des valeurs AD de rayonnement solaire direct indiquées par l'instrument de référence. Comme il n'est pas pratique d'amener tous les appareils en service sur le lieu où se trouve l'étalon primaire, on procède généralement à une comparaison régionale où les spectrophotomètres d'une zone géographique donnée sont recueillis et étalonnés soit en fonction d'un étalon itinérant, soit en fonction d'un étalon régional directement associé à l'étalon WPDS-D083. Depuis presque trois décennies, la plupart des spectrophotomètres Dobson en service aux stations de la VAG sont étalonnés tous les quatre ans dans le cadre de comparaisons organisées par l'OMM. Les campagnes d'étalonnage font appel au spectrophotomètre D065 de la NOAA (comme étalon itinérant) ou à des étalons régionaux provenant des centres régionaux d'étalonnage Dobson de l'OMM (D064, Hohenpeissenberg, Allemagne; D074, Hradec Králové, République tchèque; D089, Irene, Afrique du

Sud; D097, Buenos Aires, Argentine; D105, Perth, Australie; et D116 Tsukuba, Japon). Les résultats des comparaisons montrent que le barème d'étalonnage Dobson de l'étauon primaire WPDS est transféré aux instruments de station avec une exactitude de 1 pour cent, comme on peut le constater dans les rapports de la VAG/OMM (OMM, 1994; 2001a; 2002).

Les constantes d'étalonnage sont transférées à un instrument de terrain Brewer par comparaison avec un étalon itinérant secondaire tous les deux ans (tel que recommandé). L'instrument de référence et l'instrument de terrain mesurent simultanément les valeurs d'ozone à partir du rayonnement solaire direct pendant une journée, dans de bonnes conditions d'observation et sur une gamme suffisante de valeurs ($\mu = 1,15\text{--}3,2$). Les valeurs des coefficients d'absorption et des constantes extraterrestres pour l'instrument en service sont déterminées en ajustant les données en fonction de l'ozone total mesuré par l'étauon et au moyen de la méthode de la lampe. L'exactitude de l'étauon secondaire itinérant est vérifiée à Toronto avant son départ et après son retour pour s'assurer que l'étalonnage n'a pas été modifié pendant le déplacement. À l'exception des instruments Brewer canadiens (SMC), la majorité des spectrophotomètres Brewer en service au sein du réseau mondial sont étalonnés au moyen de l'étauon secondaire itinérant B017 détenu par l'entreprise International Ozone Service. Cet instrument de référence est directement relié au groupe de trois étalons Brewer avec une exactitude de 0,8 pour cent ; il est par ailleurs soumis, tous les un à deux ans, à un étalonnage absolu mené à l'observatoire de Mauna Loa, tout comme les trois étalons. Les résultats des comparaisons Brewer montrent que l'instrument B017 transfère le barème d'étalonnage aux stations avec une exactitude de 1 pour cent (McElroy, Sevastiouk et Lamb, 2004). Afin de mettre en place un système régional d'étalonnage Brewer pour la VAG, on a créé le premier centre d'étalonnage Brewer pour la Région VI (Europe) à l'observatoire Izaña de l'Institut météorologique national d'Espagne aux îles Canari en 2003.

On procède au réétalonnage des ozonomètres M-124 en moyenne tous les deux ans, par comparaison directe avec un spectrophotomètre Dobson à l'Observatoire principal de géophysique de Saint-Pétersbourg. Les instruments de station sont remplacés tous les deux ans par des appareils étalonnés depuis peu et apportés au site d'étalonnage de l'observatoire, où ils mesurent le rayonnement solaire direct en même temps que le spectrophotomètre Dobson D108. On enregistre les valeurs indiquées par les instruments en fonction de la distance zénithale du Soleil ainsi que la quantité d'ozone total donnée par le spectrophotomètre Dobson. Après l'étalonnage, les ozonomètres sont remis en service dans différents sites. On s'assure

ainsi de la fidélité du réseau d'ozonomètres M-124 au barème d'étalonnage de l'instrument de référence WPDS D083. Même si l'étauon D108 est étalonné tous les quatre ans avec une exactitude de 1 pour cent, l'exactitude du transfert du barème d'étalonnage au réseau d'appareils M-124 est estimée à environ 3 pour cent (Shalamyansky, 2003).

Il est nécessaire d'effectuer des contrôles réguliers en procédant à des mesures du rayonnement solaire naturel et à des essais de lampe, afin de conserver l'étalonnage de tous les instruments de référence et de terrain. On s'assure ainsi que chaque appareil fonctionne correctement et, dans le cas contraire, on prévient l'opérateur de l'existence d'un problème potentiel. Les résultats des essais servent à corriger, au besoin, l'étalonnage et à déterminer s'il faut procéder à un réétalonnage.

On vérifie chaque mois le réglage des longueurs d'onde et la réponse aux signaux du rayonnement relatif sur les spectrophotomètres Dobson. Le réglage des longueurs d'onde est contrôlé et corrigé en mesurant les raies d'émission provenant d'une lampe à vapeur de mercure. On évalue la réponse de l'appareil au rayonnement relatif aux trois paires de longueurs d'onde en mesurant les valeurs du rayonnement émis par une lampe étauon quartz halogène. Il est ainsi possible d'ajuster au besoin la constante extraterrestre de l'instrument.

Le réglage des longueurs d'onde, la réponse aux niveaux de rayonnement et le temps mort du photomultiplicateur sur les spectrophotomètres Brewer sont vérifiés chaque jour. Les raies d'émission obtenues à partir d'une lampe à vapeur de mercure servent à l'étalonnage et au réglage des longueurs d'onde. On procède à des mesures avec une lampe étauon quartz halogène pour surveiller la réponse de l'instrument au rayonnement et pour corriger, si nécessaire, les constantes extraterrestres. La linéarité est contrôlée en mesurant le temps mort du photomultiplicateur. Les résultats de ces essais sont enregistrés et utilisés pour ajuster les constantes d'étalonnage ou pour retraiter d'anciennes observations.

16.3.5.3 Différences entre les observations de l'ozone total effectuées à l'aide de spectrophotomètres Dobson et de spectrophotomètres Brewer

Même si les mesures de l'ozone total réalisées par les appareils Dobson et Brewer font appel à des techniques DOAS très semblables, elles présentent des différences sur d'autres aspects (effet du dioxyde de soufre, longueurs d'onde différentes et, par conséquent, coefficients d'absorption de l'ozone différents, et nombre de mesures par jour).

Les barèmes d'étalonnage de ces instruments définis par les étalons mondiaux respectifs sont également déterminés de manière indépendante et sont transférés aux spectrophotomètres en service au moyen de différentes techniques. Il peut donc se produire certains écarts dans les données réelles d'ozone total obtenues à partir de ces instruments. Environ 75 spectrophotomètres Dobson et 65 spectrophotomètres Brewer ont été utilisés régulièrement pour l'observation de l'ozone total au sein du réseau mondial de la VAG au cours de la période 1995-2004 (<http://www.woudc.org/>). Mais rares sont les stations qui ont procédé à des observations simultanées avec des spectrophotomètres à un même site, afin d'étudier la relation existant entre les séries de données Dobson et Brewer. Alors que certaines études (Kerr, Asbridge et Evans, 1988; DeMuer et DeBacker, 1992) n'ont pas décelé de différences notables, des analyses récentes de relevés à long terme (Staehelin et al., 1998; Köhler, 1999; Vanicek, Stanek et Dubrovsky, 2003) ont mis en évidence une dépendance saisonnière systématique des différences entre les mesures effectuées par des spectrophotomètres correctement étalonnés sur un même site, soit jusqu'à 3-5 pour cent en hiver, les observations estivales présentant généralement une bonne correspondance. Ces écarts peuvent être attribués aux éléments suivants (Kerr, 2002; OMM, 2003) :

- a) Plus forte dépendance des coefficients d'absorption différentielle de l'ozone vis-à-vis de la température dans le cas des appareils Dobson ;
- b) Lumière parasite produite par le rayonnement UV à l'intérieur des instruments ;
- c) Différents angles d'ouverture des spectrophotomètres pouvant donner différents effets du rayonnement solaire UV diffusé dans l'atmosphère ;
- d) Contribution du dioxyde de soufre à l'ozone total mesuré par les instruments Dobson dans des zones polluées ;
- e) Différentes valeurs μ calculées pour de forts angles zénithaux du Soleil.

Tous ces facteurs continuent d'être étudiés par des observations simultanées réalisées à ces stations.

16.4 MESURES DU PROFIL VERTICAL DE L'OZONE

16.4.1 Instruments servant à mesurer le profil vertical de l'ozone

Le profil vertical de l'ozone est déterminé au moyen de sondes pour l'ozone, de radars à laser (Lidars), de spectrophotomètres au sol et de divers instruments

embarqués à bord de satellites. Les plus longues séries de relevés proviennent des sondes pour l'ozone, qui se composent d'un analyseur d'ozone et d'une radiosonde. Ces sondes mesurent la concentration d'ozone en fonction de l'altitude en prélevant des échantillons d'air ambiant pendant la montée du ballon jusqu'à une hauteur située généralement entre 30 et 35 km. Les sondes pour l'ozone les plus courantes sont les appareils Brewer Mast et les sondes à cellule de concentration électrochimique (Komhyr, 1986), ou des variantes de ces instruments (Komhyr, 1997). Les stations japonaises ont recours à leur propre sonde à iodure de carbone (KC 96).

Les appareils au sol mesurent régulièrement le profil de l'ozone par télédétection. Les valeurs du rayonnement UV provenant du ciel au zénith pendant le crépuscule, relevées par un spectrophotomètre Dobson ou Brewer, servent à établir les profils de l'ozone à l'aide de la méthode d'inversion Umkehr. Certaines stations sont aujourd'hui dotées de Lidars UV mis au point au cours des années 1980. Les instruments Lidar au sol, ainsi que les instruments à hyperfréquences sont opérés à l'intérieur d'un laboratoire. On effectue généralement les observations du ciel au zénith au travers d'une trappe de toit ou d'une coupole. Dans certains cas, les Lidars pointent leur faisceau laser et leur détecteur dans d'autres directions. Ceux-ci doivent être localisés de manière à éviter toute interférence pouvant être créée par d'autres sources de rayonnement UV, et les appareils à hyperfréquences doivent être protégés contre tout parasitage susceptible de provenir d'émetteurs radio hyperfréquences. On limite habituellement l'emploi de la technique du Lidar aux conditions nocturnes où l'ennuagement n'est pas trop prononcé. Les profils sont établis par l'intégration de nombreuses décharges laser réalisées sur une période de quelques heures.

16.4.2 Méthodes de mesure du profil vertical de l'ozone

16.4.2.1 Mesures par sondes pour l'ozone

Les sondes pour l'ozone emportées par gros ballons météorologiques déterminent, en fonction de l'altitude, les profils de l'ozone atmosphérique du sol jusqu'à une hauteur de 30-35 km dans la moyenne stratosphère. Elles sont utilisées de manière régulière dans toutes les régions climatiques et dans des conditions météorologiques extrêmes. Elles constituent les principaux appareils de mesure du profil de l'ozone depuis les années 1960.

Tous les modèles de sondes in situ à réaction chimique humide fonctionnent selon le principe de l'oxydation électrochimique de l'iodure de potassium

par l'ozone dans une solution aqueuse. La réaction chimique produit deux électrons par molécule d'ozone captive dans la solution. Le courant qui en résulte est proportionnel au nombre de molécules d'ozone pompées par la ou les cellules de réaction. Les sondes sont composées principalement d'une cellule de réaction, dans laquelle les molécules d'ozone réagissent avec la solution chimique (barboteur), d'une pompe à air, d'une alimentation électrique et d'une interface électronique qui convertit le signal de courant brut et le transfère à la radiosonde. Afin de protéger les pièces sensibles de l'instrument contre les impacts mécaniques et les faibles températures, tous les composants sont montés dans une boîte de styromousse. Une radiosonde météorologique reliée à la sonde permet de transférer le signal obtenu à un récepteur au sol.

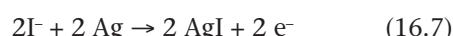
• Principe de fonctionnement

Voici comment la sonde Brewer Mast peut établir des mesures. Son principe de fonctionnement est plus simple que celui des appareils ENSCI plus récents ou des analyseurs à cellule de concentration électrochimique et à pompe (ECC), qui se composent de deux cellules séparées par un diaphragme (Komhyr, 1986). Les analyseurs ECC sont dotés d'une électrode en platine dans chaque cellule, alors que les appareils Brewer Mast possèdent une cathode en platine et une anode en argent, toutes deux placées à l'intérieur d'une cellule de réaction unique.

À la cathode en platine, l'iode est oxydé selon la formule suivante :

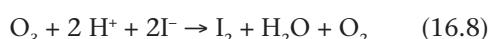


À l'anode en argent, l'argent est oxydé par l'iodure selon la formule suivante :



Comme AgI est stable, il est fixé à l'anode et n'est pas disponible pour d'autres réactions.

Si l'on applique une tension de 410 mV entre la maille en platine et le fil d'argent, la tension de polarisation entre les deux éléments est compensée. Aucun électron ne circule entre l'anode et la cathode et la concentration d'iode et d'iodure dans la cellule atteint un équilibre électrochimique. Si une molécule d'ozone pénètre dans la solution, elle peut réagir avec l'iodure selon la formule ci-après :



Cela a pour effet de rompre l'équilibre et deux électrons circulent jusqu'à la restauration de l'état d'équilibre. Dans un cycle de réaction complet, deux

électrons sont relâchés par la molécule d'ozone. Le courant produit correspond à la quantité d'ozone qui réagit dans le barboteur par unité de temps.

N molécules d'ozone produisent une charge $Q = N.2.e$. Si l'on applique la loi des gaz parfaits ($p.V = N.k.T$, où p est la pression partielle de l'ozone, V le volume, N le nombre de molécules d'ozone, k la constante de Boltzmann et T la température absolue, le tout dans un volume d'air donné), il s'ensuit que :

$$p.V = Q.k.T/(2.e) \quad (16.9)$$

ou, comme $Q = i.t$, où i est le courant mesuré et t le temps :

$$p = i.k.T/(2.e) . t/V \quad (16.10)$$

ou :

$$p = 4.31 \cdot 10^{-3} i \cdot T \cdot t / V \quad (16.11)$$

où p est la pression partielle de l'ozone (en millipascals), i est le courant mesuré (en μA), T est la température à la pompe (en K), et V/t est le volume d'air, V , pompé à travers la cellule par unité de temps t (en 100 ml s^{-1}).

Les concentrations d'ozone atmosphérique correspondent généralement à un courant de l'ordre de quelques microampères. L'interface de la sonde convertit le courant en un signal qui est transmis à la radiosonde. Cette dernière transfère ensuite le signal d'ozone, avec les paramètres météorologiques, à la station terrestre, où tous les signaux sont décodés et enregistrés.

Si on les compare aux spectrophotomètres Dobson ou aux systèmes Lidar, les sondes pour l'ozone possèdent certaines caractéristiques distinctes. Même si elles font l'objet d'une vérification poussée en laboratoire avant le lancement, elles peuvent se détériorer en cours de vol et donner de mauvaises lectures. Par ailleurs, il est quasi impossible de maintenir sur une longue période la stabilité d'un nombre élevé de sondes. Il est par conséquent fortement recommandé de normaliser chaque opération de sondage. Pour ce faire, il faut étalonner le profil de sondage intégré dans le plan vertical avec une mesure de l'ozone total en coïncidence rapprochée. Le rapport entre l'ozone total mesuré et l'ozone intégré dans le plan vertical provenant de la sonde permet d'obtenir le facteur de correction qui doit être appliqué à chaque valeur du profil. Le profil de sondage primaire devrait, toutefois, excéder la hauteur de pression de 17 hPa sans grands écarts. Pour obtenir une bonne approximation, il est nécessaire

d'avoir recours à d'autres hypothèses, par exemple un rapport de mélange constant au-dessus du profil mesuré.

16.4.2.2 Mesures par la méthode Umkehr

Le profil vertical de l'ozone est télémesuré au sol au moyen de la méthode Umkehr. Cette méthode repose sur le lien de dépendance existant entre, d'une part, l'absorption différentielle du rayonnement UV solaire à deux longueurs d'onde traversant l'ozone atmosphérique et diffusé vers la surface de la Terre par le ciel au zénith et, d'autre part, la répartition verticale de l'ozone. Ce lien est plus fort lorsque le soleil s'approche de l'horizon. On mesure le rapport du rayonnement d'un ciel clair au zénith à deux longueurs d'onde UV et pour des distances zénithales situées entre 60 et 90°. Si l'on trace le logarithme de ce rapport en fonction de la distance zénithale, on voit que la pente de la courbe change de signe à un point donné. On appelle ce graphique une courbe Umkehr, mot allemand signifiant «inversion».

La méthode Umkehr standard a été mise au point (Götz, Meetham et Dobson, 1934; Dütch, 1957; Dobson, 1957; Mateer, 1964; Mateer et DeLisi, 1992) et utilisée pour analyser les valeurs fournies par les spectrophotomètres Dobson. Depuis la mise à jour de 1992, la version UMK92 a servi au traitement opérationnel des données Umkehr au Centre mondial de données sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet (WOUDC) à Toronto, Canada. On compare les mesures du rayonnement d'un ciel bleu à plusieurs distances zénithales solaires, situées entre 60 et 90°, aux résultats obtenus avec un modèle de rayonnement à diffusion multiple (modèle direct). On suppose que le profil vertical de l'ozone est uniforme dans le plan horizontal et constant pendant la période d'observation. Une mesure représentative de l'ozone total est nécessaire dans les données d'entrée. L'analyse, fondée sur une première approximation climatologique, permet de parvenir à une solution itérative. Le profil ainsi établi est traduit en valeurs moyennes de pression partielle pour les neuf couches de pression ci-après :

Numéro de couche	Gamme de pressions (hPa)
1	500–250
2	250–125
3	125–62,5
4	62,5–31,2
5	31,2–15,6
6	15,6–7,8
7	7,8–3,9
8	3,9–1,96
9	1,96–0,98

Le passage à l'algorithme UMK92 effectué par le groupe REVUE (Bojkov et al., 2002) comprenait l'utilisation de profils *a priori* révisés fondés sur la nouvelle climatologie de l'ozone (McPeters, Logan et Labow, 2003) et la mise à jour du modèle direct. Les travaux réalisés ultérieurement par Petropavlovskikh, Bhartia et McElroy (2004) ont autorisé une plus grande optimisation de l'extraction des données Umkehr pour l'analyse des tendances (UMK04). Une modification clé concerne l'établissement du profil *a priori*. Dans l'algorithme UMK92, les profils *a priori* sont construits à partir de la colonne d'ozone total mesurée par le même instrument. L'algorithme UMK92 comporte donc la propriété indésirable suivante: les profils *a priori* varient en fonction du jour et de l'année. Ces variations font qu'il est difficile d'être certain que les changements à long terme sont forcés par les profils *a priori* ou s'ils correspondent à l'information contenue dans les mesures. À la fois les algorithmes REVUE et UMK04 font appel à des profils *a priori* fixes, qui varient en fonction de la saison et de la latitude, mais qui ne présentent pas de fluctuations d'un jour à l'autre ou à long terme. Le nouvel algorithme UMK04 a un modèle direct amélioré. Le modèle d'inversion est optimisé afin de réduire au minimum la dépendance *a priori* dans l'extraction. Le contenu en informations indépendantes des mesures Umkehr est analysé à l'aide de la méthode AK (averaging kernel ou noyau moyen ou fonction de balayage) mise au point par C.D. Rodgers (1990). À partir de l'analyse AK du contenu obtenu avec l'algorithme UMK04, il est recommandé d'avoir recours à un système à huit couches, où l'ozone est combiné dans les couches zéro et un et les couches deux et trois afin de représenter les changements, respectivement dans la troposphère et la basse stratosphère. On s'est rendu compte que l'information sur l'ozone dans la couche quatre avait un contenu semblable à celui des couches cinq à huit. On devrait donc considérer les couches quatre à huit comme des couches individuelles renfermant des renseignements principalement indépendants sur l'ozone stratosphérique. Les couches neuf et au-delà ne montrent pas d'information indépendante mais pourraient être combinées à la couche huit en vue d'obtenir une colonne d'ozone exacte au-dessus de 4 hPa ; cette estimation est importante pour comparer les données obtenues à partir de satellite et du sol. Même si cette technique est trop bruitée pour suivre la variabilité à court terme dans l'ozone atmosphérique, elle est capable de suivre les changements à long terme dans l'ozone moyen mensuel sur sept ou huit couches, avec des erreurs raisonnablement non corrélées et un minimum d'effet provenant des informations *a priori*.

Quelques stations utilisent la méthode Umkehr simplifiée mise au point par DeLisi, Mateer et Bhartia

(1985) pour les spectrophotomètres Dobson et appliquée aux instruments Brewer (McElroy, Hahn et Hare, 1998). Cette technique offre une exactitude comparable à celle atteinte avec la méthode standard mais comporte plusieurs avantages opérationnels car la gamme de distances zénithales solaires est réduite, c'est-à-dire de 80 à 90°. La période de mesure est beaucoup plus courte, ce qui accroît la probabilité d'obtenir une observation sans nuages. La saison d'observation s'en trouve également allongée aux hautes latitudes, puisque le Soleil atteint une hauteur de 10° pendant un plus grand nombre de jours dans l'année. En outre, les effets indésirables des variations de l'ozone ont moins de chance de survenir étant donné le raccourcissement de la période d'observation. Il est là encore nécessaire de posséder une valeur de l'ozone total comme donnée d'entrée.

16.4.2.3 Mesures par Lidar

Le profil de l'ozone peut être déterminé au sol par un système Lidar (radar optique). Le principe en est le suivant. Une courte impulsion laser dont la longueur d'onde se trouve dans le spectre ultraviolet d'absorption de l'ozone est émise en direction du zénith. On mesure ensuite le rayonnement rétrodiffusé en fonction du temps. Le moment d'arrivée donne la hauteur de diffusion tandis que la variation du rayonnement dans le temps fournit une mesure de l'absorption attribuable à la présence d'ozone. On a recours à au moins deux longueurs d'onde : l'une est absorbée par l'ozone, l'autre pas et sert de référence. En comparant les signaux de retour de haut en bas d'une couche atmosphérique, et entre les deux longueurs d'onde, on peut déterminer l'absorption d'ozone au sein d'une couche, et ainsi la quantité d'ozone présent. Cette technique de mesure à double différentiel (altitude et longueur d'onde) présente le grand avantage d'être auto-étalonnée. Les paramètres instrumentaux s'annulent dans les équations. La seule information externe nécessaire est la section efficace d'absorption de l'ozone aux deux longueurs d'onde.

Les mesures de l'ozone sont parasitées à certaines heures et altitudes lorsque la concentration d'aérosols est plus élevée, notamment après des éruptions volcaniques. On peut toutefois éviter en grande partie ce problème en ayant recours à des signaux de retour qui changent de longueur d'onde par diffusion Raman vibratoire à partir de l'azote, au lieu des signaux de retour à diffusion de Rayleigh élastique. La méthode du Lidar n'est utilisable que de nuit, en l'absence d'une forte nébulosité. Le profil est déterminé par intégration d'un grand nombre de décharges laser échelonnées sur une période d'environ quatre heures.

16.4.2.4 Mesures micro-ondes (hyperfréquences)

On peut déterminer la distribution de l'ozone en altitude grâce à la radiométrie micro-onde ou hyperfréquences. Cette technique passive permet d'observer les raies de transition rotationnelles à élargissement selon la pression émises par les molécules atmosphériques avec un moment dipolaire permanent. Comme les signaux sont émis dans la région des hyperfréquences, ils ne sont pas parasités par les nuages et ils autorisent l'observation dans presque toutes les conditions météorologiques. Les raies de transition généralement utilisées pour mesurer l'ozone se situent à 110,836 GHz et à 142,175 GHz, même s'il existe de nombreuses autres transitions possibles (Parrish et al., 1992). Afin d'obtenir un profil selon l'altitude, il est nécessaire de procéder à une analyse spectrale des signaux détectés. On peut utiliser à cette fin divers spectromètres, comme les spectromètres à filtre acousto-optique ou à transformée par compression d'impulsions, des auto-correlateurs ou des bancs de filtres et, plus récemment, des spectromètres numériques à transformée de Fourier. En combinant de manière optimale les données issues des spectres mesurés et certaines informations *a priori* sur l'état de l'atmosphère (Rodgers, 1976; 1990), il est possible d'établir un profil de l'ozone dans la région située entre 20 et 80 km d'altitude. Selon la sensibilité de l'instrument, les profils peuvent être établis avec une résolution temporelle de l'ordre de quelques minutes, ce qui permet l'étude des variations diurnes de l'ozone, par exemple dans la mésosphère (Zommerfelds et al., 1989 ; Connor et al., 1994).

Les instruments à hyperfréquences sont utilisés par un certain nombre de groupes à l'échelle de la planète, et plusieurs d'entre eux fournissent des données au Réseau de détection des modifications dans la composition de l'atmosphère (NDACC) (voir <http://www.ndacc.org>). Au sein de ce réseau, des observations sont effectuées régulièrement à Berne et Payerne (Suisse), à Spitsbergen (Norvège), à Mauna Loa (Hawaii) et à Lauder (Nouvelle-Zélande).

16.4.2.5 Autres méthodes de mesure

D'autres méthodes permettent de mesurer le profil vertical de l'ozone avec des instruments situés au sol ou embarqués sous ballons, fusées ou satellites. Certaines de ces nouvelles méthodes commencent à fournir des données de manière régulière. Ce sont notamment :

- La photométrie d'absorption UV *in situ* ;
- L'absorption différentielle du rayonnement UV solaire ;
- L'émission thermique dans l'infrarouge ;
- L'émission thermique aux hyperfréquences ;
- L'absorption dans l'infrarouge.

Le photomètre d'absorption UV *in situ* qui sert normalement à quantifier l'ozone en surface a été modifié pour mesurer l'ozone à partir de la plate-forme sous ballon. La concentration d'ozone est évaluée en fonction de l'altitude pendant la montée (ou la descente) de l'instrument dans l'atmosphère.

L'absorption différentielle du rayonnement UV solaire produit une mesure de l'ozone total selon l'altitude, à partir d'une plate-forme en ascension (ballon ou fusée). Le profil de l'ozone est déterminé par la différentielle de la quantité d'ozone total en fonction de la courbe d'altitude.

Un instrument emporté par un ballon ou un satellite qui balaie le limbe terrestre peut mesurer le rayonnement thermique émis par l'ozone dans l'infrarouge ou aux hyperfréquences. On inverse le rayonnement mesuré selon l'angle de visée pour estimer la répartition verticale de l'ozone.

L'absorption du rayonnement solaire dans l'infrarouge est déterminée pendant le lever ou le coucher du Soleil à partir de la plate-forme d'un ballon. On trace le profil vertical de l'ozone en inversant le signal obtenu en fonction de la trajectoire tangentielle dans les couches atmosphériques, sous le ballon.

16.4.3 Erreurs dans la mesure du profil vertical de l'ozone

Il existe plusieurs sources d'erreur lorsque l'on mesure le profil de l'ozone au moyen de sondes. Si la solution d'iodure de potassium est contaminée, l'appareil est moins sensible à la présence d'ozone. Un mauvais calcul du débit d'air généré par la pompe entraînerait une erreur systématique dans la détermination de l'ozone à tous les niveaux. Il est également possible que les caractéristiques de pompage se modifient en vol.

L'exactitude absolue du profil intégré (ozone total) pour un profil obtenu à partir d'une sonde est déterminée par l'exactitude absolue de la mesure de l'ozone total au sol, puisque le profil intégré est

normalisé en fonction de cette mesure. L'erreur se situerait entre 3 et 5 pour cent. Par ailleurs, l'exactitude d'une mesure à une hauteur donnée dans l'atmosphère dépend, précisément, de l'altitude. En général, on estime que la valeur obtenue présente une exactitude de ± 10 pour cent dans la troposphère et de ± 5 pour cent dans la stratosphère, à moins de 10 hPa. Au-delà de 10 hPa, l'augmentation des incertitudes concernant le rendement et le débit de la pompe porte l'erreur estimée à 15 pour cent pour une pression de 5 hPa.

La méthode d'inversion Umkehr comporte elle aussi un certain nombre de sources d'erreur. Les résultats sont faussés si l'ozone n'est pas réparti uniformément dans le plan horizontal ou si la quantité d'ozone total ou la répartition verticale de l'ozone varie au cours de la période de mesure. L'exactitude est réduite lorsque des aérosols sont en suspension dans la stratosphère à la suite d'une activité volcanique. Les erreurs de profil sont associées à l'épaisseur optique et à la hauteur de la charge d'aérosols. Une mauvaise évaluation du profil *a priori* établi en première approximation provoquerait des erreurs dans l'inversion finale. Les erreurs d'inversion (voir le tableau 16.2 ci-dessous) sont causées par le lissage de la variabilité à petite échelle dans le profil (première rangée dans le tableau) et par la contamination du bruit de mesure (deuxième rangée dans le tableau). On suppose que la variance de ce bruit augmente en fonction de la distance zénithale du Soleil entre 0,3 et 1,6 valeur de N (à partir de l'analyse des données coïncidentes fournies par deux instruments Dobson à la station d'Arosa sur plusieurs années). L'incertitude globale de la méthode Umkehr (rangée inférieure dans le tableau) est estimée à 25 pour cent dans la troposphère (couches zéro et un), à 15 pour cent dans la basse stratosphère (couches trois et deux), à moins de 10 pour cent dans la moyenne stratosphère (couches quatre à six), à moins de 10 pour cent dans la haute stratosphère (couches sept à huit), et les erreurs augmentent avec l'ozone intégré aux couches huit et au-delà.

En ce qui concerne les valeurs recueillies par Lidar dans des conditions d'aérosols de fond, l'in-

Tableau 16.2. Erreurs dans les valeurs d'ozone mesurées dans huit couches indépendantes au moyen d'un appareil Dobson et selon la méthode Umkehr

Numéro de couche	8+	8	7	6	5	4	2+3	1+0
% Erreurs de lissage	10,3	5,7	6,2	6,5	6,5	10,5	15,6	22,6
% Erreurs de mesure	6,0	4,1	3,2	4,3	2,9	2,9	1,8	6,8
% Erreurs totales	11,9	7,0	6,9	7,8	7,1	10,9	15,7	23,6

certitude du profil vertical de l'ozone, évaluée à 3 pour cent, dépend en grande partie de l'incertitude des valeurs absolues du coefficient d'absorption de l'ozone. Quand il y a beaucoup d'aérosols dans la stratosphère et que l'on n'a pas recours aux canaux Raman, les valeurs peuvent être faussées de plus de 100 pour cent. Par contre, dans des conditions normales, l'erreur aléatoire statistique est la plus grande source d'incertitude, généralement 2 pour cent jusqu'à 30 km d'altitude et 18 pour cent à 45 km.

Comparativement à d'autres méthodes, la radiométrie hyperfréquences présente une résolution en altitude relativement faible, de l'ordre de 8 à 15 km (demi-largeur AK), selon l'altitude (Connor et al., 1995). L'erreur aléatoire peut atteindre de 3 à 10 pour cent des valeurs estimées, toujours selon l'altitude. L'apport de l'information *a priori* est de moins de 20 pour cent dans la plage 20-55 km, mais augmente au-delà de ces limites.

16.4.4 **Comparaison, étalonnage et maintenance des instruments servant à mesurer le profil vertical de l'ozone**

Les directives à suivre pour les spectrophotomètres et les ozonomètres apparaissent dans la section 16.3.5. Les sondes pour l'ozone sont des instruments jetables qui ne servent en principe qu'une fois, à moins qu'on ne les remette en état après les avoir récupérées. Il n'est pas nécessaire de conserver longtemps des références d'étalonnage pour un type particulier de sonde et il n'existe pas de sonde étalon qui pourrait servir à étalonner les autres. Il convient toutefois de suivre des règles uniformisées pour préparer les différentes sondes avant leur lancement. Ces règles sont décrites en détail par Komhyr (1986), pour les sondes à cellule de concentration électrochimique, et dans la publication de l'OMM (1992), pour les sondes Brewer Mast. Quelques études ont été menées sur les différences existant entre les sondes ENSCI et les sondes à pompe, compte tenu de la performance des pompes à air et des diverses concentrations de solution de réaction. Pour de plus amples indications, on se reportera à la publication de l'OMM (2004a) et à Johnson et al. (2002). On continue de préparer les consignes d'utilisation standard pour les deux types de sonde à cellule de concentration électrochimique.

Les observations de l'ozone au moyen d'instruments terrestres à hyperfréquences ont été amplement validées par comparaison avec d'autres instruments à hyperfréquences et d'autres techniques, notamment les Lidars et les satellites (Tsou et al., 1995; Schneider et al., 2003). On a par ailleurs effectué des études sur

la possibilité de compléter les profils d'ozone établis à partir de sondages par des données hyperfréquences (Calisesi et al., 2003).

16.5 **CORRECTIONS DES MESURES DE L'OZONE**

Les données sur l'ozone total (rayonnement solaire direct, rayonnement lunaire direct et rayonnement solaire diffus au zénith) et sur la répartition verticale de l'ozone (Umkehr, sondes pour l'ozone et Lidars) relevées par les stations du réseau mondial de la VAG sont transmises au WOUDC de Toronto (Canada), où elles sont archivées et affichées sur le site Web du WOUDC à <http://www.woudc.org>. Des résumés annuels sont par ailleurs diffusés dans la publication intitulée «Données mondiales sur l'ozone» (CD-ROM seulement). Le WOUDC est géré par Environnement Canada, en collaboration avec l'OMM. Soulignons d'autres sources importantes de données sur l'ozone, comme la base de données de l'Institut norvégien de recherche atmosphérique (<http://www.nilu.no/nadir>), axée sur l'acquisition et la diffusion rapides de données pour les campagnes d'observation, et le site Web du NDACC (<http://www.ndacc.org>). Les mesures de l'ozone en surface sont transmises au Centre mondial de données relatives aux gaz à effet de serre de l'OMM (WDCGG), hébergé par le Service météorologique japonais, où les données sont affichées sur le site Web (<http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg.html>) ou publiées sur CD-ROM. Le WOUDC et le WDCGG recueillent également des métadonnées sur les observations et des données sur l'ozone conservées par les centres de données.

Les caractéristiques des instruments susceptibles de fausser la mesure de l'ozone (par exemple les constantes d'étalonnage, la réponse en fonction de la température et les réglages des instruments en fonction des conditions géographiques et climatiques locales) sont souvent corrigées dans la procédure d'observation elle-même ou lors de la détermination des valeurs de l'ozone à partir des données indiquées par les appareils. On corrige parfois la valeur de l'ozone total obtenue par le rayonnement solaire direct pour tenir compte des caractéristiques spectrales d'un instrument, ceci afin de pouvoir procéder aux mesures lorsque la masse atmosphérique dépasse 3,2 (les caractéristiques spectrales du spectrophotomètre sont généralement négligeables au-dessous de ce chiffre). C'est surtout le cas des données obtenues aux hautes latitudes en hiver. Les corrections sont empiriques et fondées sur les observations effectuées les jours où les mesures relevées avec de fortes valeurs de masse atmosphérique (jusqu'à 5-6) peuvent être comparées aux valeurs recueillies à des niveaux plus bas.

Mentionnons que les observations Dobson faisant appel à la méthode «focused sun» ou les mesures de l'ozone total avec le nouvel appareil Brewer MK III (instrument à double monochromateur) peuvent être effectuées jusqu'à une valeur $\mu = 6$.

Les données Umkehr sont envoyées au WOUDC qui les traite pour déterminer les profils verticaux de l'ozone, lesquels sont publiés avec les données brutes. Tous les autres types de mesure sont traités à la station même qui transmet les valeurs d'ozone total ou de concentration d'ozone ainsi obtenues.

La répartition verticale de l'ozone établie par sondage est corrigée en normalisant le profil intégré en fonction d'une mesure au sol de l'ozone total. Il est nécessaire de formuler des hypothèses sur la quantité d'ozone présent dans l'atmosphère au-dessus du profil déterminé. En l'absence de mesure de l'ozone total, on applique un facteur de correction de 1,0.

Chaque station est tenue de veiller à l'exactitude de ses données. En cas de doute, le WOUDC signale l'erreur présumée afin que la station puisse vérifier et corriger au besoin ses observations. Les données Umkehr traitées par le WOUDC passent par un processus de contrôle de la qualité avant d'être publiées. Une station peut corriger les valeurs déjà transmises et les soumettre à nouveau pour publication ultérieure. En général, c'est l'obtention de nouvelles informations sur une constante d'instrument ou la découverte d'une erreur, ou bien une amélioration dans la réduction des données qui rend cette opération nécessaire. Les observations rectifiées sont publiées dans le même format que les autres mais avec la mention «corrigé». Elles figurent également avec cette mention dans le catalogue annuel qui renferme toutes les données fournies par les stations.

16.6

OBSERVATIONS AU MOYEN D'INSTRUMENTS EMBARQUÉS À BORD D'AVIONS ET DE SATELLITES

L'ozone atmosphérique est également mesuré par des instruments installés à bord d'avions et de satellites. Les observations aériennes sont généralement réalisées au moyen de photomètres in situ qui prélèvent en vol des échantillons d'air dans la troposphère et dans la basse stratosphère. Les résultats obtenus sont surtout utilisés dans le cadre de campagnes de recherche sur la chimie de l'atmosphère, par exemple les projets MOZAIC, CARIBIC ou SCOUT.

Ce sont des instruments de télédétection emportés par satellite qui se chargent de la surveillance à grande échelle de l'ozone atmosphérique. Les program-

mes concernés se divisent en deux grandes catégories selon leur durée : campagnes de surveillance à long terme qui produisent de grands jeux de données (mondiaux) destinés à l'analyse des tendances et à la cartographie opérationnelle de l'ozone, ou missions expérimentales de durée limitée.

Les instruments satellitaires peuvent être regroupés selon la méthode de mesure du rayonnement employée pour la quantification de l'ozone au moyen de techniques DOAS. Un premier groupe comprend les instruments à visée nadir qui balaiennent le rayonnement UV diffusé en vue d'obtenir l'ozone total. Un autre groupe d'instruments mesurent les profils verticaux de l'ozone au moyen des méthodes du rayonnement solaire direct, du rayonnement lunaire direct ou d'occultation du Soleil dans différentes régions du spectre, ou en balayant les émissions thermiques aux hyperfréquences à travers le limbe atmosphérique (OMM, 1998).

Depuis 1978, année où ont commencé les observations de l'ozone depuis l'espace à l'aide du spectro-mètre imageur d'ozone total (Heath, Krueger et Park, 1978), d'énormes progrès ont été accomplis dans ce domaine. Une douzaine environ d'instruments satellitaires ont été lancés dans le cadre de campagnes prolongées ou de missions expérimentales, et d'autres lancements sont prévus dans la prochaine décennie. Par ailleurs, les technologies et paramètres de ces systèmes embarqués ont été améliorés, notamment en ce qui concerne la résolution verticale et horizontale, la résolution spectrale, les algorithmes de traitement des observations et le nombre de constituants atmosphériques mesurés.

Les observations de l'ozone par satellite sont étroitement associées aux observations menées au sol, principalement aux fins de validation des mesures spatiales et d'assimilation à grande échelle dans des modèles numériques de prévision et de cartographie de l'ozone. Mettre en place et intégrer des systèmes d'observation terrestre et satellitaire de l'ozone constituent une tâche stratégique pour l'OMM, les agences spatiales et d'autres groupes scientifiques connexes représentés par le Comité sur les satellites d'observation de la Terre. Afin d'obtenir de plus amples informations sur la conception du réseau et sur les missions d'observation récentes, actuelles et à venir, on se reportera à la publication de l'OMM (2001b) et à sa mise à jour OMM (2004b). Les meilleures descriptions des projets actuels et prévus peuvent être consultées sur leurs sites Web provisoires.

ANNEXE 16.A

UNITÉS DE MESURE DE L'OZONE TOTAL ET LOCAL

Unité Dobson 1 DU = 1 milli-atmo-centimètre (1 m-atm-cm)
 = 10^{-5} m d'ozone à température et pression normales (TPN)
 = 2,141 4 mg cm⁻¹
 = $2,687 \cdot 10^{16}$ molécules cm⁻²

Tableau 16.A.1. Quantités définissant l'ozone local, unités dans le Système International d'Unités et Intégration sur la verticale

Quantité en	Masse volumique			Concentration dans l'air local (rapport de mélange)		P					
	Nombre volumique	Masse volumique	Par rapport à TPN (total différencié)	En masse	En volume						
				m^{-3}	$kg\ m^{-3}$	/[TPN]	/	/	Pa	n	ρ
Nombre volumique	////	$n \cdot \frac{\rho^o M}{L}$	$n \cdot \frac{1}{L}$	$n \cdot \frac{M}{L} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$n \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$n \cdot \frac{P^o}{L} \cdot T^*$					
Masse volumique	$\rho \cdot \frac{L}{\rho^o M}$	////	$\rho \cdot \frac{1}{\rho^o M}$	$\rho \cdot \frac{1}{\rho^o} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$\rho \cdot \frac{1}{\rho^o M} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$\rho \cdot \frac{P^o}{\rho^o M} \cdot T^*$					
Masse volumique par rapport à TPN	$s \cdot L$	$s \cdot \rho^o M$	////	$s \cdot M \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$s \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$s \cdot P^o \cdot T^*$					
Rapport de mélange en masse	$m \cdot \frac{L}{M} \cdot \frac{P}{T^*}$	$m \cdot \rho^o \cdot \frac{P^*}{T^*}$	$m \cdot \frac{1}{M} \cdot \frac{P^*}{T^*}$	////	$m \cdot \frac{1}{M}$	$m \cdot \frac{P^o}{M} \cdot P^*$					
Rapport de mélange en volume	$v \cdot L \cdot \frac{P^*}{T^*}$	$v \cdot \rho^o M \cdot \frac{P^*}{T^*}$	$v \cdot \frac{P^*}{T^*}$	$v \cdot M$	////	$v \cdot P^o \cdot P^*$					
Pression partielle	$P \cdot \frac{L}{P^o} \cdot \frac{1}{T^*}$	$P \cdot \frac{\rho^o M}{P^o} \cdot \frac{1}{T^*}$	$P \cdot \frac{1}{P^o} \cdot \frac{1}{T^*}$	$P \cdot \frac{M}{P^o} \cdot \frac{1}{P^*}$	$P \cdot \frac{1}{P^o} \cdot \frac{1}{P^*}$	////					
Concentration type à 25 km	$4,97 \cdot 10^{18}$	$3,96 \cdot 10^{-7}$	$1,85 \cdot 10^{-7}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$6,03 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-2}$					
Intégration verticale (z en mètres)	$\int n \cdot dz = L \cdot x$	$\int \rho \cdot dz = \rho^o M \cdot x$	$\int s \cdot dz = x$	$\int m \cdot dP = -Mg \cdot x$	$\int v \cdot dP = -g$	$\int p \cdot d(\ln P) = -g \cdot x$					

$P^* = P/P^o$, $T^* = T/T^o$	Température et pression locales normalisées	
P^o , T^o	TPN	$1,013\ 25 \cdot 10^5\text{ Pa}, 273,15\text{ K}$
ρ^o	Masse volumique de l'air à TPN	$1,293\text{ kg m}^{-3}$
L	Nombre de Loschmidt	$2,687 \cdot 10^{25}\text{ m}^{-3}$
g	Accélération due à la pesanteur	$9,807\text{ m s}^{-2}$
M	Rapport masses mol. : ozone/air	$1,657$
x	Ozone total	unité m (à TPN)
P, T	Pression, température de l'air local	unités Pa, K

Tableau 16.A.2. Unités courantes de mesure de l'ozone local et conversion réciproque

Unité	Masse volumique			Rapports de mélange		Pression (hPa)
	$(10^{11}\text{ mol cm}^{-3})$	$(\mu\text{g m}^{-3})$	(UD km^{-1})	$(\mu\text{g g}^{-1})$ (ppmv)		
$10^{11}\text{ mol cm}^{-3}$ [$10^{17}\text{ mol m}^{-3}$]	—	7,97	0,371	0,022 9 $\frac{T}{P}$	0,013 8 $\frac{T}{P}$	0,013 8
$1\mu\text{g m}^{-3}$ [10^{-9} kg m^{-3}]	0,125	—	0,046 7	0,002 87 $\frac{T}{P}$	0,001 73 $\frac{T}{P}$	0,001 73 T
1 DU km^{-1}	2,69	21,4	—	0,061 4 $\frac{T}{P}$	0,037 0 $\frac{T}{P}$	0,037 0 T
$1\mu\text{g g}^{-1}$ [10^{-6} en masse]	$43,7 \frac{P}{T}$	$348 \frac{P}{T}$	$16,3 \frac{P}{T}$	—	0,603	0,603 P
1 ppmv [10^{-6} en volume]	$72,4 \frac{P}{T}$	$578 \frac{P}{T}$	$27,4 \frac{P}{T}$	1,657	—	P
1 hPa [10^{-4} Pa]	$72,4 \frac{1}{T}$	$578 \frac{1}{T}$	$27,0 \frac{1}{T}$	1,657 $\frac{1}{T}$	$\frac{1}{P}$	—

• Note :

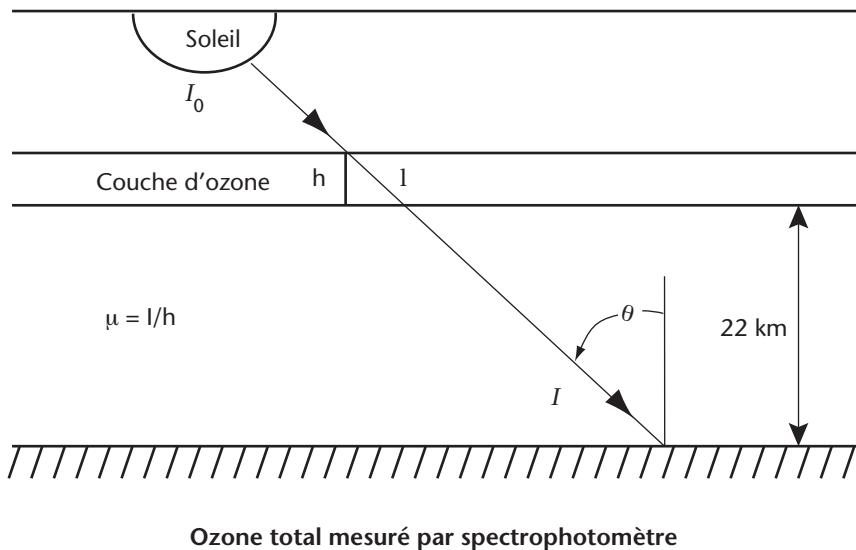
Pression (P) en hectopascals.

Température (T) en kelvin.

Les nombres entre crochets donnent la valeur équivalente en unités du Système international.

ANNEXE 16.B

THÉORIE DE LA MESURE



On voit dans la figure ci-dessus la trajectoire du rayonnement solaire dans la couche d'ozone de l'atmosphère terrestre. L'intensité du rayonnement du Soleil (I_λ) à la longueur d'onde λ mesurée à la surface de la Terre est donnée par la formule suivante :

$$\log (I_\lambda) = \log (I_{0\lambda}) - \alpha_\lambda X \mu - \alpha'_\lambda X' \mu' - (16.B.1)$$

$$\beta_\lambda m - \delta_\lambda \sec (\theta)$$

où :

I_0 est l'intensité du rayonnement à l'extérieur de l'atmosphère terrestre (valeur extraterrestre) à la longueur d'onde λ ;

α_λ est le coefficient d'absorption de l'ozone à la longueur d'onde λ (nm) ;

X est la quantité d'ozone total dans l'atmosphère (m à TPN) ;

μ est le rapport entre la masse d'air le long du trajet oblique du faisceau à travers la couche d'ozone et la masse d'air dans le plan vertical, soit la masse d'air optique relative de la couche d'ozone ;

α'_λ est le coefficient d'absorption du dioxyde de soufre à la longueur d'onde λ (nm) ;

X' est la quantité de dioxyde de soufre dans la colonne totale d'atmosphère (m à TPN) ;

μ' est le rapport entre la masse d'air le long du trajet oblique du faisceau à travers la couche de SO_2 et la masse d'air dans le plan vertical, soit la masse d'air optique relative de la couche de dioxyde de soufre ;

β_λ est le coefficient de diffusion moléculaire Rayleigh de l'air à la longueur d'onde λ ;

m est le rapport de la masse d'air le long du trajet oblique du faisceau à travers toute l'atmosphère et la masse d'air dans le plan vertical, soit la masse d'air optique relative de toute l'atmosphère ;

δ_λ est le coefficient de diffusion particulaire des aérosols à la longueur d'onde λ ;

θ est la distance zénithale apparente du Soleil.

Dans la réalité, on ne peut obtenir une mesure exacte de l'ozone en mesurant le rayonnement à une seule longueur d'onde car il est difficile de maintenir la sensibilité absolue d'un instrument pendant une période prolongée. De plus, la diffusion particulaire provoquée par les aérosols et les fins nuages modifie sensiblement le rayonnement transmis.

Il faut donc répéter la mesure à plusieurs longueurs d'onde et déterminer l'ozone total au moyen de

techniques de spectroscopie d'absorption optique différentielle (DOAS). Les intensités du rayonnement à N longueurs d'onde sont exprimées par N équations prenant la forme de l'équation 16.B.1 avec des valeurs différentes pour $I_{0\lambda}$, α_λ , α'_λ , β_λ et δ_λ . En procédant à une combinaison linéaire de ces N équations, on obtient :

$$\begin{aligned} \sum w_\lambda \log(I_\lambda) &= \sum w_\lambda \log(I_{0\lambda}) - (\sum w_\lambda \alpha_\lambda) X\mu - (16.B.2) \\ &(\sum w_\lambda \alpha'_\lambda) X'\mu' - (\sum w_\lambda \beta_\lambda) m - (\sum w_\lambda \delta_\lambda) \sec(\theta) \end{aligned}$$

où \sum représente la sommation de 1 à N et w_λ est un ensemble de N valeurs de pondération, une pour chaque longueur d'onde.

Les valeurs de pondération liées à chaque longueur d'onde (w_λ) sont choisies de manière à minimiser les effets des autres composants de l'atmosphère, en particulier les aérosols. Celles qui sont affectées aux mesures Dobson AD atténuent les conséquences de la présence de brume sèche. On ne tient pas compte de l'effet du SO₂ sur ces mesures, en dépit du fait que ce gaz ajoute environ 1 pour cent d'ozone fictif aux observations effectuées à certaines stations. Les valeurs de pondération affectées aux mesures de l'ozone total obtenues avec un spectrophotomètre Brewer réduisent les effets de la présence d'aérosols et de dioxyde de soufre. Le tableau ci-dessous donne les longueurs d'onde utilisées pour les mesures Dobson AD et Brewer standard, avec les valeurs w_λ correspondantes.

Si l'on ne tient pas compte des effets du dioxyde de carbone et de la brume sèche, l'équation 16.B.2 peut être réécrite comme suit :

$$F + \beta m = F_0 - \alpha X \mu \quad (16.B.3)$$

$$\begin{aligned} \text{où : } F &= \sum w_\lambda \log(I_\lambda) \\ F_0 &= \sum w_\lambda \log(I_{0\lambda}) \\ \beta &= \sum w_\lambda \beta_\lambda \\ \alpha &= \sum w_\lambda \alpha_\lambda \end{aligned}$$

Par conséquent, la valeur de l'ozone total est donnée par :

$$X = \frac{(F_0 - F - \beta m)}{\alpha \mu} \quad (16.B.4)$$

Dans cette équation, F est mesuré, F_0 est une constante d'étalonnage égale à la valeur de F à l'extérieur de l'atmosphère terrestre (constante extraterrestre de l'instrument), tandis que βm et $\alpha \mu$ sont des valeurs calculées.

Il faut connaître la valeur F_0 propre à chaque instrument pour être en mesure de déterminer la quantité d'ozone total. Cette constante est déterminée pour la plupart des instruments en service par comparaison directe avec l'étoile primaire ou les instruments de référence secondaires (voir la section 16.3.5.1).

Longueurs d'onde et valeurs de pondération effectives utilisées avec les mesures Dobson et Brewer standard

Mesure Dobson AD		Mesure Brewer standard	
Longueur d'onde (λ) (nm)	Valeur de pondération (w_λ)	Longueur d'onde (λ) (nm)	Valeur de pondération (w_λ)
305,5	paire A	1,0	310,1
325,4		-1,0	313,5
317,6	paire D	-1,0	316,8
339,8		1,0	320,0

(voir p. I.16-7, renvoi n° 2)

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Asbridge, A.I., Vanicek, K. et Stanek, M., 1998 : Application of Dobson zenith polynomials for different instruments, locations and seasons. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de R.D. Bojkov et G. Visconti) (L'Aquila, Italie, 12-21 septembre 1996), pp. 979-982.
- Association internationale de météorologie et des sciences de l'atmosphère (AIMSA), 1967 : *Resolution of the International Ozone Commission of the International Association for Meteorology and Atmospheric Physics*. Fourteenth General Assembly of IAMAP, Lucerne, 4 octobre 1967.
- Attmannspacher, W. et Hartmannsgruber, R., 1982 : Intercomparison of instruments measuring ozone near the ground at Hohenpeissenberg Observatory, 1er October 1978-30 Avril 1979. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, N° 161, Offenbach-sur-le-Main.
- Bass, A.M. et Paur, R.J., 1985 : The ultraviolet cross-sections of ozone: I. The measurements, II: Results and temperature dependence. *Atmospheric Ozone* (publié sous la direction de C.S. Zerefos et A. Ghazi), Reidel, Dordrecht, pp. 606-616.
- Bojkov, R.D., Fioletov, V.E. et Shalamjansky, A.M., 1994 : Total ozone changes over Eurasia since 1973 based on reevaluated filter ozonometer data. *Journal of Geophysical Research*, 99, pp. 22985-22999.
- Bojkov, R.D., Kosmidis, E., Deluisi, J.J., Petropavloskikh, I., Filetov, V.E., Godin, S. et Zerefos, C., 2002 : Vertical ozone distribution characteristics deduced from 44 000 reevaluated Umkehr profiles (1957-2000). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 79, numéro 3-4, pp. 127-158.
- Brion, J.A., Chakir, A., Daumont, D., Malicet, J. et Parisse, C., 1993 : High resolution laboratory absorption cross section of O₃: Temperature effect. *Chemical Physics Letters*, 213, pp. 610-612.
- Burrows, J.P., Richter, A., Dehn, A., Deters, B., Himmelmann, S., Voigt, S. et Orphal, J., 1999 : Atmospheric remote sensing reference data from GOME: 2. Temperature dependent absorption cross sections of O₃ in the 231-794 nm range. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 61, pp. 509-517.
- Calisesi, Y., Stübi, R., Kämpfer, N. et Viatte, P., 2003 : Investigation of systematic uncertainties in Brewer Mast ozone soundings using observations from a ground based microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 20, N° 11, pp. 1543-1551.
- Connor, B.J., Siskind, D.E., Tsou, J.J., Parrish, A. et Remsberg, E.E., 1994 : Ground based microwave observations of ozone in the upper stratosphere and mesosphere. *Journal of Geophysical Research*, 99, pp. 16757-16770.
- Connor, B.J., Parrish, A., Tsou, J.J. et McCormick, M.P., 1995 : Error analysis for the ground based microwave ozone measurements during STOIC. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 9283-9291.
- DeBacker, H., 1998 : Zenith observations of total ozone in Uccle. *Publication scientifique N° 006*, Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.
- DeLisi, J.J., Mateer, C.L. et Bhartia, P.K., 1985 : On the correspondence between standard Umkehr, short Umkehr, and solar backscattered ultraviolet vertical ozone profiles. *Journal of Geophysical Research*, 90, pp. 3845-3849.
- DeMuer, D. et DeBacker, H., 1992 : Revision of 20 years of Dobson total ozone data at Uccle (Belgium): Fictitious Dobson total ozone trends induced by sulfur dioxide trends. *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 5921-5937.
- Dobson, G.M.B., 1930 : Observations of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions. Part IV, *Proceedings of the Royal Society of London*, A129, pp. 411-433.
- Dobson, G.M.B., 1957 : Observer's handbook for the ozone spectrophotometer. *Annals of the International Geophysical Year*, 5, pp. 46-89.
- Dütsch, H.U., 1957 : Evaluation of the Umkehr effect by means of a digital electronic computer. *Ozone and General Circulation in the Stratosphere*, Scientific Report No. 1, Arosa, Lichtklimatisches Observatorium.
- Dütsch, H.U., 1959 : Vertical ozone distribution from Umkehr observations. *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology*, A11, pp. 240-251.
- Evans, R.D., Carbaugh, G., Walsh, B., Oltmans, S., Quincy, D., O'Neil, M., Clark, M. et Köhler, V., 2004a : Results of international Dobson spectrophotometer intercalibrations held since 2000. In: *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de C.S. Zerefos), Université d'Athènes, pp. 532-533.
- Evans, R.D., Carbaugh, G.L., Oltmans, S.J., Walsh, B., Quincy, D.M., O'Neil, M. et Clark, M., 2004b : Dobson calibration scales and application to network instruments. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de C.S. Zerefos), Université d'Athènes, pp. 534-535.
- Feister, U., 1991 : Field performance of a Brewer spectrometer and filter ozonometer M 124 as compared to a Dobson spectrophotometer. *Zeitschrift für Meteorologie*, 4, pp. 291-305.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Fioletov, V.E., Hare, E.W. et Carty, E.J., 2004 : Recent advancements and developments at the WOUDC. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de C.S. Zerefos), Université d'Athènes, pp. 536-537.
- Götz, F.W.P., Meetham, A.R. et Dobson, G.M.B., 1934 : The vertical distribution of ozone in the atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, A145, pp. 416-446.
- Gushchin, G.P., Sokolenko, S.A. et Kovalyev, V.A., 1985 : Total-ozone measuring instruments at the USSR station network. *Atmospheric Ozone* (publié sous la direction de C.S. Zerefos et A. Ghazi), Reidel, Dordrecht, pp. 543-546.
- Heath, D.F., Krueger, A.J. et Park, H., 1978 : The solar backscatter ultraviolet (SBUV) and total ozone mapping spectrometer (TOMS) experiment. Dans: C.R. Madrid, *The NIMBUS-7 User's Guide*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, pp. 175-211.
- Johnson, B.J., Oltmans, S.J., Vömel, H., Smit, H.G.J., Deshler, T. et Kröger, C., 2002 : Electrochemical concentration cell (ECC) ozonesonde pump efficiency measurements and tests on the sensitivity to ozone of buffered and unbuffered ECC sensor cathode solutions. *Journal of Geophysical Research*, 107, D19 doi: 10.1029/2001JD000557.
- Kerr, J.B., McElroy, C.T. et Olafson, R.A., 1981 : Measurements of ozone with the Brewer ozone spectrophotometer. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de J. London) (Boulder, Colorado, août 1980), pp. 74-79.
- Kerr, J.B., Asbridge, I.A. et Evans, W.F.J., 1988 : Intercomparison of total ozone measured by the Brewer and Dobson spectrophotometers at Toronto. *Journal of Geophysical Research*, 93, pp. 11129- 11140.
- Kerr, J.B., McElroy, C.T. et Wardle, D.I., 1998 : The Brewer instrument calibration center 1984 1996. *Proceedings of the XVIII Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de R.D. Bojkov et G. Visconti), pp. 915-918.
- Kerr, J.B., 2002 : New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra. *Journal of Geophysical Research*, 107(D23), 4731, doi: 10.1029/2001JD001227.
- Klausen, J., Zelleweger, C., Buchmann, B et Hofer, P., 2003 : Uncertainty and bias of surface ozone measurements at selected Global Atmosphere Watch sites. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D19), 4622, doi: 10.1029/2003JD003710.
- Köhler, U., 1999 : A comparison of the new filter ozonometer MICROTOPS II with Dobson and Brewer spectrophotometers at Hohenpeissenberg. *Geophysical Research Letters*, 26, pp. 1385-1388.
- Köhler U., Claude, H., Vanicek, K., Stanek, M. et Evans, R., 2004 : The Dobson instrument – still a backbone of ozone monitoring? *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de C.S. Zerefos), Université d'Athènes, pp. 121-122.
- Komhyr, W.D., 1986 : Operations Handbook – *Ozone Measurements to 40km Altitude with Model 4A Electrochemical Concentration Cell (ECC) Ozonesondes*. NOAA Technical Memorandum ERL ARL 149.
- Komhyr, W.D., 1997 : *Instruction Manual of Model KZ ECC Atmospheric Ozone Sounding System*. ENSCI-Corporation, Boulder, Colorado, États-Unis d'Amérique.
- Komhyr, W.D., Grass, R.D. et Leonard, R.K., 1989 : Dobson spectrophotometer 83: A standard for total ozone measurements, 1962-1987. *Journal of Geophysical Research*, D7, 94, pp. 9847-9861.
- Komhyr, W.D., Mateer, C.L. et Hudson, R.D., 1993 : Effective Bass Paur 1985 ozone absorption coefficients for use with Dobson ozone spectrophotometers. *Journal of Geophysical Research*, 98, pp. 451- 465.
- Lamb, K., 2004 : International Ozone Service, communication personnelle.
- Mateer, C.L., 1964 : *A Study of the Information Content of Umkehr Observations*. Thèse de doctorat, Université du Michigan.
- Mateer, C.L. et DeLuisi, J.J., 1992 : A new Umkehr inversion algorithm. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54, pp. 537-556.
- McElroy, C.T., Hahn, J.F. et Hare, E., 1998 : Determining high altitude trends in ozone from Brewer Umkehr observations made at Canadian stations. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de R. D. Bojkov et G. Visconti), pp 25-28.
- McElroy, C.T., Sevastiouk, V. et Lamb, K., 2004 : Calibrating the Brewer spectrophotometers with the travelling standard. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de C.S. Zerefos), Université d'Athènes, pp. 577-578.
- McPeters, R.D., Logan, J.A. et Labow, G.J., 2003 : Ozone climatological profiles for Version 8 TOMS and SBUV retrievals, *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 84, Fall Meeting Supplement, Abstract A21D-0998.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Megie G.J., Miller, A.J. et Bojkov, R.D., 1991 : *Recommendations for Implementation of the Bass Paur Ozone Absorption Coefficients*. Commission internationale de l'ozone de l'Association internationale de météorologie et de physique de l'atmosphère (AIM-PA), Genève, 18 décembre 1991.
- Molina, L.T. et Molina, M.J., 1986 : Absolute absorption cross sections of ozone in the 185 - to 350 - nm wavelength range. *Journal of Geophysical Research*, 91, pp. 14501-14508.
- Organisation météorologique mondiale, 1980 : Operations Handbook – *Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer* (W.D. Komhyr). Rapport N° 6 du Projet OMM de recherche et de surveillance concernant l'ozone, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1982a : *Review of the Dobson Spectrophotometer and its Accuracy* (R.E. Basher). Rapport N° 13 du Projet OMM de recherche et de surveillance concernant l'ozone, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1982b : *The Stratosphere 1981 Theory and Measurements*. Rapport N° 11 du Projet OMM de recherche et de surveillance concernant l'ozone, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : Règlement technique, Volume I, OMM N° 49, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990 : *Report of the International Ozone Trends Panel: 1988*. Rapport N° 18 du Projet OMM de recherche et de surveillance concernant l'ozone, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Measurement of Atmospheric Ozone Profiles Using the Brewer/Mast Sonde: Preparation, Procedure, Evaluation* (H. Claude, R. Hartmannsgruber et U. Köhler). Rapport N° 17 du Projet OMM de recherche et de surveillance concernant l'ozone, OMM/TD-N° 179, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993 : *Rapport final abrégé et résolutions de la quarante quatrième session du Conseil exécutif*. OMM N° 780, Genève
- Organisation météorologique mondiale, 1994 : *Survey of WMO sponsored Dobson Spectrophotometer Intercomparisons* (R.E. Basher). Rapport N° 19 du Projet OMM de recherche et de surveillance concernant l'ozone, OMM/TD N° 657, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1998 : *SPARC/IOC/GAW Assessment of Trends in the Vertical Distribution of Ozone* (N. Harris, R. Hudson et C. Phillips). Rapport N° 43 du Projet OMM de recherche et de surveillance concernant l'ozone, OMM/TD N° 935, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2001a : *Reports on WMO International Comparisons of Dobson Spectrophotometers: Part I: Arosa, Switzerland, 19-31 July 1999; Part II: Buenos Aires, Argentina, 19 November-12 December 1999; Part III: Pretoria, South Africa, 18 March 10 April 2000* (R. D. Evans). Rapport N° 138 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1016, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2001b : *WMO/CEOS Report on a Strategy for Integrating Satellite and Ground based Observations of Ozone*. Rapport N° 140 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1046, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2002 : *WMO GAW International Comparisons of Dobson Spectrophotometers at the Meteorological Observatory Hohenpeissenberg, Germany: 21 May 10 June 2000 and 23 July 5 August 2000; 10 23 June 2001 and 8 21 July 2001* (U. Köhler). Rapport N° 145 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1114, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Comparison of Total Ozone Measurements of Dobson and Brewer Spectrophotometers and Recommended Transfer Functions* (J. Staehelin, J. Kerr, R. Evans et K. Vanicek). Rapport N° 149 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1147, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2004a : *JOSIE-1998: Performance of ECC Ozone Sondes of SPC 6A and ENSCI Z Type* (H.G.J. Smit et W. Straeter). Rapport N° 157 de la Veille de l'atmosphère globale, OMM/TD N° 1218, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2004b : Rapport N° 159 de l'Équipe d'experts pour les observations intégrées de la chimie de l'atmosphère à l'échelle du globe, OMM/TD N° 1235, Genève.
- Parrish, A., Connor, B.J., Chu, W.P., Tsou, J.J. et McDermid, I.S., 1992 : Ground-based microwave monitoring of stratospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 2541-2546.
- Paur, R.J. et McElroy, F.F., 1979 : *Technical Assistance Document for the Calibration of Ambient Ozone Monitors*. EPA 600/4 79 57, Agence de la protection de l'environnement des États-Unis d'Amérique.
- Petropavlovskikh, I., Bhartia, P.K. et McElroy, T., 2004 : Assessment of information content of automated Dobson and Brewer Umkehr measurements. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (publié sous la direction de C.S. Zerefos), Université d'Athènes.
- Rodgers, C.D., 1976 : Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measu-

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- ments of thermal radiation. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 14, pp. 609-624.
- Rodgers, C.D., 1990 : Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements. *Journal of Geophysical Research*, 95, (DS) pp. 5587-5595.
 - Schneider, N.O., Lezeaux, O., de la Noë, J., Urban, J. et Ricaud, P., 2003 : Validation of ground-based observations of stratospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 108, (D17) 4540, doi: 10.1029/2002JD002925.
 - SCI-TEC, 1993 : *The Brewer Ozone Spectrophotometer – Maintenance Manual*. SCI-TEC Instruments Inc., publication MM BA C05 Rev. J.
 - Shalamyansky, A.M., 2003 : Communication personnelle avec le Groupe consultatif scientifique pour l'ozone de l'OMM.
 - Staehelin, J., Renaud, A., Bader, J., McPeters, R., Viatte, P., Hoegger, B., Bugnion, V., Giroud, M. et Schill, H., 1998 : Total ozone series at Arosa, Switzerland: Homogenization and data comparison. *Journal of Geophysical Research*, 103, D5, pp. 5827-5842.
 - Tsou, J.J., Connor, B.J., Parrish, A., McDermid, I.S. et Chu, W.P., 1995 : Ground based microwave monitoring of middle atmosphere ozone: Comparison to Lidar and stratospheric and gas experiment II satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 100, D2, pp. 3005-3016.
 - Vanicek K., 2003 : *Calibration History of the Dobson 074 and Brewer 098 Ozone Spectrophotometers*. Publication de l'Institut hydrométéorologique tchèque, Prague.
 - Vanicek, K., Stanek, M. et Dubrovsky, M., 2003 : *Evaluation of Dobson and Brewer Total Ozone Observations from Hradec Kralove*, République tchèque, 1961-2002. Publication de l'Institut hydrométéorologique tchèque, Prague.
 - Wardle, D.I., Evans, W.F.J., Fast, H., Forester, A.J., Henderson, G.S., Kerr, J.B. et Vupputuri, R.K.R., 1987 : *Stratospheric Ozone Science in Canada. An Agenda for Research and Monitoring*. Internal Report of the Atmospheric Environment Service No. ARD 87 3, Toronto.
 - Zommerfelds, W.C., Kunzi, K.F., Summers, M.E., Bevilacqua, R.M. et Strobel, D.F., 1989 : Diurnal variations of mesospheric ozone obtained by ground-based microwave radiometry. *Journal of Geophysical Research*, 94, pp. 12819-12832.

CHAPITRE 17

MESURE DE LA COMPOSITION DE L'ATMOSPHÈRE

17.1 GÉNÉRALITÉS

Le présent chapitre a pour principal objet de présenter aux spécialistes des instruments les techniques de mesure des divers constituants qui composent l'atmosphère, et en particulier des constituants anthropiques qui relèvent de la rubrique générale de la pollution. Ces mesures s'accompagnent souvent de la mesure des variables météorologiques de base présentées dans les chapitres précédents.

Ces mesures sont réalisées essentiellement dans le but d'étudier l'évolution du climat et de définir des dispositions visant à réduire les incidences négatives pour l'environnement et à protéger directement la santé humaine. La Veille de l'atmosphère globale (VAG) a été créée au sein de l'OMM pour coordonner les mesures de la pollution de l'atmosphère effectuées par les pays Membres de l'Organisation.

Le programme de la VAG intègre de nombreuses activités de surveillance et de recherche impliquant la mesure des propriétés chimiques et physiques de l'atmosphère. Il sert de système d'alerte précoce pour détecter l'évolution des gaz à effet de serre, de la couche d'ozone, du transport des polluants atmosphériques sur de longues distances, de l'acidité et de la toxicité de la pluie et de la charge atmosphérique des aérosols. La VAG, approuvée en juin 1989 par le Conseil exécutif de l'OMM, a pour rôle de renforcer et de coordonner le programme de collecte de données environnementales lancé par l'Organisation dans les années 1950. La nouvelle VAG a absorbé le Système mondial d'observation de l'ozone (SMOO₃), le Réseau de stations de surveillance de la pollution atmosphérique de fond (BAPMoN) et d'autres réseaux plus modestes. La VAG s'occupe de la conception de cadres, de normes, d'étalonnages comparatifs et de systèmes de collecte de données en vue du suivi mondial et de l'évaluation des données.

Les principales variables à déterminer sont les suivantes :

- a) Les gaz à effet de serre : dioxyde de carbone, chlorofluorocarbures, méthane et protoxyde d'azote ;
- b) L'ozone : ozone de surface, colonne totale d'ozone, profil vertical et gaz précurseurs ;
- c) Les rayonnements et l'épaisseur optique ou la transparence de l'atmosphère : trouble atmosphérique, rayonnement solaire, rayons UVB, visibilité, charge totale de l'atmosphère en particules d'aérosols et vapeur d'eau ;
- d) La composition chimique des dépôts : dépôts secs et humides de composés sulfurés et azotés, et dépôts humides de métaux lourds (avec les précipitations) ;
- e) Les gaz réactifs : dioxyde de soufre et espèces sulfurées réduites, oxydes d'azote et espèces azotées réduites, monoxyde de carbone et composés organiques volatils ;
- f) La concentration des particules et les caractéristiques de leur composition ;
- g) Les radionucléides : krypton 85, radon, tritium et composition isotopique de substances sélectionnées.

Les instruments et les techniques employés pour la détermination quantitative et qualitative des composants de l'atmosphère sont complexes et parfois difficiles à manier. Ainsi, il faut non seulement s'assurer du bon fonctionnement du matériel, mais procéder à des étalonnages réguliers pour obtenir des mesures précises et fiables, l'assurance de la qualité étant très importante. On ne peut obtenir de bons résultats pour la plupart des mesures décrites ici qu'avec la collaboration étroite de spécialistes de niveau professionnel.

17.2 MESURE DES VARIABLES SPÉCIFIQUES

La mesure opérationnelle exacte de la composition de l'atmosphère reste une tâche difficile, en raison essentiellement de la très faible concentration des espèces chimiques présentant le plus d'intérêt, de la nécessité de suivre fréquemment des protocoles complexes de mesure et d'analyse, ainsi que de problèmes liés à l'étalonnage du matériel requis. L'orientation et l'emplacement corrects des capteurs et du matériel selon les protocoles de mesure définis revêtent une grande importance. Nous présentons brièvement, dans les sections ci-après, la mesure de certaines variables. On trouvera des renseignements plus détaillés dans OMM (1993).

17.2.1 Gaz à effet de serre

La concentration croissante des gaz à effet de serre, et notamment du dioxyde de carbone (CO₂), menace d'altérer le climat et le temps de la Terre et risque de conduire à un réchauffement généralisé progressif au cours du XXI^e siècle. L'ampleur de ce réchauffement et la gravité de ses effets vont dépen-

dre de la future teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre. Le suivi de la concentration des gaz à effet de serre est donc crucial pour l'avenir de la planète. D'autres gaz à effet de serre sont surveillés partout sur le globe: le méthane (CH_4), les chlorofluorocarbures (CFC) et le protoxyde d'azote (N_2O). L'ozone troposphérique est également considéré comme un gaz à effet de serre.

L'OMM surveille le niveau de CO_2 depuis les années 1960, époque où elle a établi un réseau mondial qui, depuis lors, a été intégré à la VAG, principale source d'informations sur la chimie de l'atmosphère relevant de l'Organisation. Le Centre mondial de données relatives aux gaz à effet de serre de l'OMM, implanté à Tokyo, au Japon, a été créé en 1990 pour archiver des données sur la série complète des gaz à effet de serre (OMM, 1995a).

• *Dioxyde de carbone*

Le CO_2 est l'un des gaz à l'état de trace les plus courants et les plus importants du système Terre-océans-atmosphère. Il est d'origine naturelle et industrielle. Le CO_2 intervient de manière décisive dans divers processus biologiques du cycle naturel du carbone. En raison du rôle joué par le CO_2 en tant qu'un des gaz à effet de serre les plus importants, les scientifiques se sont efforcés d'en comprendre les incidences potentielles sur le climat et sur les changements à l'échelle planétaire.

Actuellement, la mesure de la concentration de fond du CO_2 atmosphérique se fait surtout à l'aide d'analyseurs de gaz non dispersifs dans l'infrarouge. La plupart de ces instruments peuvent atteindre l'exactitude voulue ($\pm 0,1$ partie par million (ppm) à des concentrations ambiantes de 360 à 390 ppm) si l'on prend les précautions nécessaires, en ce qui concerne par exemple l'utilisation de gaz de référence (soigneusement étalonnés). Pour l'essentiel, une source de rayons infrarouges produit un faisceau de rayonnement qui traverse une cellule de référence et une cellule de mesure d'échantillons. La différence d'intensité des rayons qui franchissent les deux cellules et un filtre optique qui laisse passer la bande d'absorption du CO_2 à 4,25 μm donne la mesure de la différence de concentration de CO_2 entre les gaz que contiennent les deux cellules. En cours de fonctionnement normal, un gaz comparatif ayant une concentration constante mais pas nécessairement connue avec exactitude passe par la cellule de référence. À intervalles réguliers, une série de gaz de référence couvrant la gamme normale de mesure traverse la cellule de l'échantillon, ce qui étalonne la réponse de l'analyseur. Tous les gaz qui passent par les deux cellules sont soigneusement asséchés, si bien que les mesures obtenues sont exprimées en titre molaire du CO_2 dans l'air sec.

En vue de pouvoir comparer sur le plan mondial les mesures du CO_2 de fond, on a mis au point une technique d'étalonnage reposant sur un système de gaz de référence à trois niveaux. Le système, qui se compose de gaz primaires, de gaz secondaires et de gaz de référence, exige l'échange des gaz de référence entre les divers programmes nationaux et un laboratoire central d'étalonnage. Le laboratoire d'étalonnage se trouve à Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique, dans les locaux du Laboratoire de recherche sur le système terrestre (ESRL), qui relève de la Division de la surveillance mondiale (GMD) de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA). L'analyse dans l'infrarouge donne une trace constante de la concentration ambiante de CO_2 intercalée avec la mesure des gaz d'étalonnage à intervalles fixes. On procède au moins une fois par semaine à un essai d'étalonnage, sur une large gamme de concentrations, au moyen des étalons secondaires.

Une autre technique de mesure du CO_2 , généralement applicable à de nombreux gaz à l'état de trace implique la captation d'air dans des flacons de verre ou d'acier inoxydable spécialement conçus. Ces flacons sont expédiés dans un laboratoire central où la teneur en CO_2 est déterminée à l'aide d'analyseurs de gaz non dispersifs dans l'infrarouge (Komhyr et al., 1989). Cette technique, qui s'est standardisée, est employée dans divers pays.

• *Chlorofluorocarbures*

Les chlorofluorocarbures (CFC) – dont le CFC 11 (CCl_3F) et le CFC 12 (CCl_2F_2) – constituent une famille de composés qui ne se rencontrent pas à l'état naturel dans l'environnement. Depuis le début de leur fabrication, dans les années 1930, les CFC ont été employés comme gaz réfrigérants, comme solvants pour des applications industrielles et pour le nettoyage à sec et comme propulseurs dans les bombes aériennes. Vu que les CFC résistent à la destruction dans la troposphère et que leur production s'accélérerait avec le temps, la concentration de ces produits dans la basse atmosphère s'accroissait de 4 pour cent par an environ. Depuis que certaines restrictions à leur emploi ont été imposées, la concentration de CFC 11 décroît d'à peu près 1 pour cent par an, mais celle du CFC 12 continue de progresser à raison de 1 pour cent par an environ.

Les CFC contribuent à l'effet de serre. Ils constituent une source de chlore atmosphérique et entraînent la destruction de l'ozone, que l'on observe particulièrement au-dessus de l'Antarctique. Ils ont un temps de séjour long dans l'atmosphère.

La technique standard d'analyse des CFC consiste à faire passer un échantillon complet d'air dans un

séchoir avant de l'injecter dans un chromatographe en phase gazeuse. Des détecteurs à capture d'électrons servent à détecter les divers gaz. On intercale la mesure des gaz d'étalonnage avec la mesure des échantillons d'air afin d'obtenir la concentration absolue. On peut remplacer la détermination sur place par une technique consistant à recueillir les échantillons dans des flacons propres en acier inoxydable et à les expédier dans un laboratoire central pour analyse (Prinn et al., 1983).

• *Protoxyde d'azote*

Le protoxyde d'azote (N_2O) est un gaz d'origine naturelle et anthropique qui contribue à l'effet de serre (à raison de 6 pour cent environ). Il a une durée de vie très longue dans l'atmosphère (125 ans). Sa concentration augmente au rythme de 0,8 partie par milliard (ppb) chaque année. Les sources de N_2O sont les océans, la combustion de matières fossiles et de biomasse et les sols agricoles. Le protoxyde d'azote est inerte dans la troposphère et son principal puits consiste en une transformation photochimique dans la stratosphère.

Un chromatographe à capture d'électrons sert à mesurer le N_2O , comme plusieurs gaz à l'état de trace. On détermine la concentration en interprétant les mesures par rapport à des gaz d'étalonnage dont la teneur en N_2O est connue. L'échantillonnage du N_2O dans des flacons est un autre moyen d'en mesurer la concentration. Les flacons sont expédiés dans un laboratoire central pour analyse (Elkins et al., 1996).

• *Méthane*

Le méthane (CH_4) est l'hydrocarbure le plus abondant de l'atmosphère. Sa chimie dans la troposphère influe sur la concentration du radical hydroxyle (OH) et du monoxyde de carbone (CO). Dans la stratosphère, l'oxydation du CH_4 par le radical OH est une source majeure de vapeur d'eau. Sa réaction avec des atomes de chlore constitue une étape terminale de la destruction de l'ozone catalysée par le chlore. Une large bande d'absorption dans l'infrarouge, à 7,66 μm , où le CO_2 et l'eau (H_2O) sont faiblement absorbés, fait du méthane un gaz à effet de serre efficace. Les raisons pour lesquelles on est passé d'une augmentation d'environ 1 pour cent par an de la teneur en CH_4 à des concentrations à peu près stables dans l'atmosphère restent largement inconnues.

Dans la plupart des cas, on mesure le méthane atmosphérique par chromatographie en phase gazeuse au moyen d'un détecteur à ionisation de flamme. Les systèmes faisant appel à la chromatographie gazeuse sont très fiables et, d'un point de vue technique, moins difficiles à utiliser et à entretenir que d'autres dispositifs. En général, le CH_4 est séparé des autres composants d'un échantillon d'air par un tamis mo-

léculaire à température constante. Le détecteur à ionisation de flamme possède, pour le CH_4 , une limite de détection inférieure à 20 parties par milliard en volume (ppbv) (1 ppbv = 1 molécule sur 10^9). Les mesures sont effectuées par rapport à un étalon.

Des étalons composés d'air possédant un rapport de mélange stable et bien caractérisé du CH_4 sont essentiels pour les mesures. Lorsque les étalons s'épuisent, il est nécessaire d'affecter l'échelle de mesure à de nouveaux étalons de travail.

Plusieurs techniques d'introduction des échantillons sont envisageables. Un laboratoire central de traitement des échantillons en flacons devrait disposer d'un collecteur automatique permettant d'introduire en alternance les échantillons et les étalons dans le système d'analyse, bien que l'opération puisse se faire manuellement. Dans le cas d'un instrument installé sur le terrain, un robinet de sélection du courant à commande automatique permet de choisir entre les étalons et les échantillons.

Une autre technique de mesure consiste à utiliser une diode laser accordable pour déterminer le rapport de mélange du CH_4 par absorption dans l'infrarouge. Cette technique, difficile à mettre en place et à exploiter, exige de vastes compétences techniques (Fried et al., 1993).

17.2.2 Ozone

Bien que l'ozone (O_3) représente moins de 0,5 ppm de l'atmosphère totale, ses propriétés radiatives et chimiques en font un constituant très important de l'atmosphère. Les techniques de mesure de l'ozone sont décrites au chapitre 16 de la Partie I.

17.2.3 Rayonnement et épaisseur optique de l'atmosphère

La mesure des diverses quantités relatives au rayonnement solaire et de l'épaisseur optique de l'atmosphère est nécessaire pour de nombreuses études sur les effets de la pollution atmosphérique. Les techniques de mesure sont décrites au chapitre 7 de la Partie I.

17.2.4 Dépôts atmosphériques

Plusieurs constituants de l'atmosphère se déposent à la surface de la Terre. On trouvera dans les sections ci-après les principes de mesure des dépôts humides et secs.

Les dépôts humides laissés par la pluie et la neige sont de bons agents d'intégration du contenu chimique et particulaire de l'atmosphère; la chimie des pré-

cipitations est la collecte et l'analyse des précipitations. Les dépôts secs résultent de la sédimentation et du tassemement d'aérosols et de gaz sur une surface; leur mesure exige des systèmes particuliers. La mesure des dépôts humides et secs a des applications dans l'étude des effets des constituants nutritifs, des acides et des matériaux toxiques, ainsi que de leur transport sur de longues distances.

17.2.4.1 Dépôts humides

Les mesures de la chimie des précipitations donnent des renseignements sur l'échange de constituants à l'état de trace entre l'atmosphère et les terres émergées ou les océans. Elles constituent ainsi un maillon important pour comprendre le cycle chimique de substances telles que le soufre, l'azote et d'autres constituants à l'état de trace.

Lorsqu'on entreprend de mesurer la chimie des précipitations, il faut veiller particulièrement à ce que toute forme de contamination, due par exemple à de la poussière, à des traces d'huile ou à des gouttelettes de transpiration par suite d'un contact humain, soit exclue pour ne pas compromettre l'utilité des mesures. Il convient pour cela de respecter à la lettre les conditions de choix du site et les protocoles opératoires sur le site (Bigelow, 1987).

La mesure de la chimie des précipitations comporte généralement deux étapes: la collecte des échantillons et l'analyse en laboratoire. Lorsque de la pluie ou de la neige tombe sur un site, on met en fonction un collecteur spécial ouvert-fermé pour recueillir l'échantillon, ou on retire le couvercle du collecteur manuel. On note la quantité de pluie indiquée par le pluviomètre national. La fréquence optimale d'échantillonnage est hebdomadaire ou quotidienne, selon les moyens financiers et humains dont on dispose et selon l'usage auquel sont destinées les données. L'expérience passée des contrôles de ce type indique qu'un échantillonnage quotidien, où le collecteur est vérifié chaque jour à un moment précis, est le plus utile sur le plan scientifique, les échantillons pouvant être conservés rapidement, ce qui prévient une dégradation biologique importante des espèces labiles. Les données quotidiennes sont également plus simples à manier lors d'opérations de modélisation au moyen d'un récepteur source. Dans le cas d'un protocole hebdomadaire, tous les événements sont composés sur une période de sept jours, ce qui risque de compromettre la mesure de certains ions, mais réduit nettement le coût de l'opération. Sur certains réseaux, l'acidité (pH) et la conductivité sont déterminées sur place dans le cadre du programme de contrôle de la qualité, et des biocides (chloroforme ou thymol, par exemple) sont ajoutés à l'échantillon avant son envoi au laboratoire (Keene et Galloway, 1984; Gillettet et Ayers, 1991).

L'étape de l'analyse commence lors de la réception de l'échantillon par le laboratoire ou l'établissement d'analyse. Pour optimiser l'analyse et en assurer la qualité, on recommande de faire appel à des laboratoires centraux et/ou nationaux, dont les performances sont testées régulièrement par l'intermédiaire des programmes d'assurance de la qualité de la VAG. Dans ces laboratoires, on détermine les principaux ions : sulfate (SO_4^{2-}), chlorure (Cl^-), nitrate (NO_3^-), hydrogène ($\text{H}^+(\text{pH})$), calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), ammonium (NH_4^+) et potassium (K^+). Les acides biogènes tels que l'acide formique et l'acide acétique, qui constituent une source importante d'acidité intrinsèque dans les zones vierges, devraient être mesurés par les stations de surveillance des concentrations de fond (Keene, Galloway et Holden, 1983). La conductivité est généralement mesurée dans le cadre d'un programme complet d'assurance de la qualité. Les différents laboratoires font appel à une grande variété de techniques d'analyse, bien qu'on ait tendance à préférer la chromatographie par échange d'ions et la spectrophotométrie d'absorption atomique comme techniques automatiques d'analyse (James, 1991).

17.2.4.2 Dépôts secs

L'expression «dépôt sec» désigne couramment tout échange chimique entre l'atmosphère et la surface qui se produit en l'absence de précipitations. Cependant, cette expression risque d'être trompeuse, car certaines substances chimiques subissent un échange bidirectionnel avec l'atmosphère. Les échanges air-surface constituent un processus complexe dont le rythme est déterminé par divers facteurs, dont la turbulence et la stratification atmosphériques, les caractéristiques chimiques et physiques des substances déposées, la présence et l'importance d'un gradient chimique entre l'atmosphère et la surface réceptrice, et les caractéristiques chimiques, physiques (altitude, étendue de la surface, etc.) et biologiques de la végétation réceptrice.

Les dépôts secs consistent en un flux lent mais continu de contaminants atmosphériques vers une surface sous-jacente. Ils sont très différents des dépôts humides, qui consistent en une libération rapide de polluants hautement concentrés dans les précipitations. En outre, les dépôts secs impliquent nécessairement des polluants transportés dans les couches les plus basses de l'atmosphère, dans l'air qui se trouve en contact avec la surface. L'importance des dépôts secs dans la plupart des régions du monde n'a jamais été correctement documentée. Les dépôts secs représentent généralement un problème beaucoup plus local que celui posé par les dépôts humides. Cependant, on estime qu'ils ont une grande importance régionale dans les régions fortement industrialisées en raison du nombre élevé de sources

d'émissions, généralement associées à la production d'énergie. Dans bien des régions, les dépôts secs sont sans doute au moins aussi importants que les dépôts humides.

Il existe de nombreuses techniques pour évaluer les dépôts secs en un point donné. Nous étudierons deux approches courantes ci-après, à savoir la mesure des flux turbulents et le suivi inférentiel des dépôts secs. D'autres techniques faisant par exemple appel aux précipitations non interceptées, aux eaux d'écoulement sur les troncs et à l'accumulation des plaques de neige ne sont pas abordées ici.

La mesure de la corrélation des tourbillons s'applique à certains polluants essentiels: dioxyde de soufre (SO_2), ozone (O_3), oxydes d'azote (NO_x), etc. Elle permet une mesure directe, servant à la comparaison avec des données inférentielles émanant de modèles, par l'emploi d'un matériel météorologique à réponse rapide ou lente et de capteurs chimiques à réponse rapide ($> 1 \text{ Hz}$). Des mesures fiables des flux peuvent être effectuées à l'aide de techniques micrométéorologiques, à condition que les utilisateurs travaillent dans un cadre théorique assez étroitement défini qui dépend plus ou moins du type de gaz à l'état de trace ou de particule à mesurer. On trouvera un bon aperçu de la théorie micrométéorologique et un bref résumé des capteurs chimiques et des techniques micrométéorologiques employés pour mesurer les flux turbulents dans Baldocchi, Hicks et Meyers (1988).

Les stations qui procèdent au suivi inférentiel des dépôts secs font appel à des consignateurs de données de dernière génération et à la mesure moyenne de variables météorologiques. Elles emploient des éléments filtrants pour l'échantillonnage de la concentration intégrée dans le temps. Alors qu'on établit généralement la moyenne des données météorologiques sur des périodes de 30 min, les éléments filtrants sont remplacés toutes les semaines. Actuellement, des éléments filtrants se présentant dans diverses configurations sont couramment employés. Une configuration caractéristique comprend un préfiltre en Teflon sur le devant, pour éliminer les particules du courant d'air, suivi d'un filtre en nylon pour éliminer l'acide nitrique et d'un troisième filtre de cellulose imprégné, par exemple, de carbonate de potassium (K_2CO_3) pour capter le soufre. On se sert généralement de K_2CO_3 pour nettoyer les filtres (avant usage), puis d'une solution d'hydroxyde de potassium pour les imprégner. D'autres techniques utilisent des barboteurs, des décomposeurs et des appareils de contrôle passifs, mais elles ne sont pas employées aussi couramment que les éléments filtrants dans les programmes de mesure sur réseau. Les données météorologiques à recueillir sont la vi-

tesse du vent, l'écart type de la direction, le rayonnement solaire incident de courtes longueurs d'onde, la température et l'humidité de l'air, l'humidité de surface et la hauteur des précipitations. On trouvera un exposé complet sur les techniques de mesure inférentielle des dépôts secs dans Hicks et al. (1991).

17.2.5 Gaz réactifs

Les gaz réactifs suivis par la VAG comprennent le CO , le SO_2 et les NO_x . Bien que ces gaz ne contribuent pas directement à l'effet de serre, ils peuvent influer sur la chimie de gaz à effet de serre importants, par leur interaction avec le radical OH présent dans l'atmosphère. Il s'agit en outre de gaz polluants qui influent sensiblement sur le milieu à la surface terrestre. Par exemple, le SO_2 et les NO_x réagissent de manière photochimique et sont les précurseurs principaux des pluies acides. Les oxydes d'azote jouent également un rôle essentiel dans la détermination de la teneur des smogs photochimiques en O_3 troposphérique au niveau du sol et dans l'eutrophisation des estuaires côtiers.

17.2.5.1 Monoxyde de carbone

Dans la troposphère non urbaine, le monoxyde de carbone (CO) est souvent le puits principal du radical OH. Il constitue ainsi un élément intime de la série de réactions photochimiques qui aboutissent à l'oxydation du carbone réduit, de l'azote et des gaz sulfurés à l'état de trace. Bien que le CO proprement dit (dont la durée de vie est de plusieurs mois) ne contribue pas directement à l'effet de serre, sa concentration, en raison de son influence sur le radical OH, a une certaine importance climatologique du fait qu'elle influe indirectement sur la concentration de nombreux gaz à effet de serre.

Il existe plusieurs techniques analytiques permettant de mesurer le CO présent dans l'atmosphère. On peut le mesurer par chromatographie en phase gazeuse, soit au moyen d'un détecteur à ionisation de flamme, soit au moyen d'un détecteur de réduction à l'oxyde mercurique (Peterson et Rosson, 1993). Les techniques à rayonnement infrarouge non dispersif s'y prêtent également, avec certaines modifications. La chromatographie fait appel à deux colonnes en série, avec tout d'abord un gel de silice pour l'élimination des impuretés, suivi de la séparation du CO, de l'hydrogène (H_2) et du CH_4 sur un tamis moléculaire. On se sert d'un détecteur à ionisation de flamme pour transformer le CO en CH_4 par un procédé catalytique avant de l'introduire dans le détecteur. Dans ce cas, le même chromatographe en phase gazeuse peut servir à mesurer le CH_4 et le CO (ainsi que d'autres hydrocarbures). On obtient facilement une exactitude des mesures de 5 à 10 pour cent. Lorsqu'on emploie un détecteur de réduction à l'oxyde

de mercure (HgO), le CO réagit avec le HgO chaud et libère de la vapeur de mercure (Hg), qui est détectée par absorption dans l'ultraviolet. Cette technique permet aussi de détecter l'hydrogène moléculaire. L'exactitude est alors de l'ordre de 1 à 2 pour cent. Les détecteurs au HgO donnent souvent une réponse non linéaire dans la plage de concentrations du CO atmosphérique. Cependant, ce problème est réduit au minimum par l'utilisation de références d'étalonnage multiples. Les techniques reposant sur des chromatographes en phase gazeuse exigent l'étalonnage des échantillons afin qu'on puisse quantifier le rapport de mélange du CO (Novelli et al., 1994).

La spectroscopie par diode laser accordable permet aussi de mesurer le niveau ambiant de CO par absorption dans l'infrarouge. Cette technique a plusieurs inconvénients: les frais de départ sont beaucoup plus élevés que dans le cas de la chromatographie en phase gazeuse, une haute compétence technique est nécessaire pour entretenir les instruments et ceux-ci se prêtent mal à un fonctionnement dans un lieu distant (Sachse et al., 1987).

Des étalons de référence consistant en de l'air sec dont le rapport de mélange du CO est soigneusement déterminé sont essentiels pour les programmes de mesure du CO qui font appel à la chromatographie en phase gazeuse, à la chromatographie en phase fluide gazeuse, au rayonnement infrarouge non dispersif ou à la spectroscopie par diode laser accordable. Par le passé, il était difficile d'obtenir des étalons de CO représentant les niveaux atmosphériques. L'OMM a choisi l'ESRL de Boulder, Colorado, comme établissement central d'étalonnage du CO. Ce laboratoire travaille en collaboration avec l'Institut Fraunhofer (Garmisch-Partenkirchen, Allemagne), les Laboratoires fédéraux suisses d'essai des matériaux et de recherche (EMPA) (Dubendorf, Suisse) et le Nitrous Oxide and Halocompounds Group (NOAA/ESRL, États-Unis d'Amérique) pour offrir au secteur de la recherche des étalons de haute qualité. Cependant, il faut encore faire preuve de prudence lorsqu'on compare des jeux de données anciens émanant de divers laboratoires pour évaluer l'évolution du CO dans l'espace ou dans le temps. S'il en est ainsi, c'est essentiellement en raison de l'emploi d'échelles étalonnées différentes qui peuvent varier jusqu'à 30 pour cent (Weeks et al., 1989). En outre, les faibles concentrations du CO placé dans des bouteilles haute pression de gaz de référence sont susceptibles de varier lentement au fil du temps.

La mesure du CO recueilli dans des flacons pose un problème très important de contamination. Les échantillons d'air introduits dans des flacons sont généralement analysés au moyen d'une des techniques faisant appel à la chromatographie en phase

gazeuse. Dans de nombreux types de récipients, le monoxyde de carbone risque d'augmenter ou de diminuer sensiblement dans un délai allant de quelques jours à quelques semaines. Il faudrait vérifier soigneusement, avant le début des mesures sur le terrain, que les techniques et le matériel employés interdisent toute contamination.

17.2.5.2 Dioxyde de soufre

Les sources de dioxyde de soufre (SO_2) atmosphérique sont la mer, l'activité volcanique, les émissions anthropiques et les processus de dégradation de la biomasse. Le SO_2 a une durée de vie caractéristique de quelques heures à plusieurs jours. Sa concentration dans les régions éloignées est inférieure à 0,05 ppbv, alors qu'elle peut dépasser 10 ppbv dans les zones urbaines. Les panaches émanant des centrales électriques et les émissions volcaniques produisent des concentrations allant jusqu'à 1000 ppbv. Le SO_2 est un gaz à effet de serre du fait qu'il absorbe l'infrarouge. Cependant, étant donné sa faible concentration par rapport à d'autres gaz à effet de serre, il est moins important en tant que tel.

Le SO_2 est une espèce à l'état de trace active sur le plan climatique car il réagit de manière photochimique dans l'atmosphère (conversion homogène) et sur les particules en suspension dans l'air (conversion hétérogène) pour produire des sulfates. Les particules sulfatées présentes dans l'atmosphère sont des noyaux de condensation actifs. Une augmentation du nombre de noyaux de condensation à l'échelle planétaire pourrait accroître l'albédo des nuages (Charlson et al., 1987). Une multiplication des particules sulfatées dans la stratosphère pourrait augmenter la réflexion des ondes courtes vers l'espace (Charlson et al., 1991). Le dioxyde de soufre joue aussi un rôle important dans la production de dépôts acides. Il forme des particules sulfatées qui retombent sur la surface de la Terre par dépôt sec ou humide. Dans les deux cas, l'excès d'acidité est transféré aux sites de dépôt, ce qui risque d'endommager les écosystèmes sensibles.

On peut procéder à une mesure continue des concentrations de SO_2 au moyen d'un analyseur de fluorescence à impulsions ou d'un détecteur à photométrie de flamme. Le temps de réponse d'un analyseur de fluorescence à impulsions est plus lent, mais sa facilité d'étalonnage, sa sûreté de fonctionnement, son exactitude et la spécificité du SO_2 le rendent préférable (Luke, 1997; Kok et al., 1990). Il existe des techniques plus sensibles faisant appel à la chromatographie en phase gazeuse. Celles-ci exigent une grande compétence technique et une attention soutenue. On peut également mesurer la concentration de SO_2 en employant des milieux filtrants, ce qui permet théoriquement d'obtenir des résultats plus précis. Il

s'agit d'une technique d'intégration qui demande une attention fréquente et l'analyse des filtres coûte cher.

Comme le SO₂ a une courte durée de vie dans l'atmosphère, il faut en connaître les sources et les puits pour comprendre le cycle du soufre. Le meilleur moyen d'y parvenir est d'utiliser des fréquences d'échantillonnage inférieures à 1 h. Ainsi, la meilleure technique pour le suivi à long terme du SO₂ consiste sans doute à associer un analyseur de fluorescence à impulsions et un échantillonnage par filtre. Les échantillons filtrés seraient exposés à des intervalles déterminés, suffisamment rapprochés pour permettre le contrôle de la qualité de l'analyseur en continu.

Le dioxyde de soufre doit être considéré comme un gaz réactif. Il peut adhérer aux conduites d'aménée ou s'oxyder dans les gouttes d'eau condensées dans les conduites. Ainsi, ces dernières doivent être constituées d'un matériau inerte (acier inoxydable par exemple), être aussi courtes que possible et être réchauffées de manière thermostatique lorsqu'il existe un risque de condensation. La mesure sur du Teflon-PFA est acceptable, après s'être assuré comme il convient de l'absence de perte due à des additifs de filtres inadaptés.

Les techniques employées sont résumées dans le numéro spécial que le Journal of Geophysical Research a consacré à l'expérience GASIE (Gas-Phase Sulfur Intercomparison Experiment). Cette série d'articles s'ouvre par une récapitulation de l'expérience signée Stecher et al. (1997).

17.2.5.3 Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO_x) composent une grande famille de gaz à l'état de trace qu'on rencontre partout dans la troposphère. Ils ont pour origine des processus anthropiques (combustion) et naturels (combustion de la biomasse, foudre, activité microbienne du sol); on pense qu'ils sont aussi transportés depuis la stratosphère. Les NO_x, qui jouent un rôle essentiel dans la détermination de la teneur de l'air en ozone, contribuent éminemment au problème des précipitations acides, surtout en Amérique du Nord. Bien qu'il soit nécessaire de connaître la quantité de ces gaz, même à l'échelle de quelques parties par billionne volume (pptv) (1 pptv = 1 molécule sur 10¹²), il existe actuellement très peu de données d'observation en dehors des zones urbanisées, en raison de l'insuffisance de matériel assez sensible, de la difficulté de mesurer précisément ces substances et des grandes compétences ou habiletés requises pour déterminer avec fiabilité de si faibles concentrations. Les oxydes d'azote les plus importants sont le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) (ces

deux composés étant souvent appelés collectivement NO_x), l'acide nitrique (HNO₃), les nitrates d'aérosols et le nitrate de peroxyacétyle (NPA). Le NO et le NO₂ sont les deux composés produits à l'origine, les autres sont le fruit de leur transformation chimique dans l'atmosphère. Le protoxyde d'azote (N₂O) est un cas à part: sa chimie est très différente de celle de tous les autres oxydes d'azote dans le sens où il est essentiellement inerte dans la troposphère. Faisant partie des gaz à effet de serre, il est abordé à la section 17.2.1.

Il faut savoir, quand on mesure ces gaz, que les transformations qui se produisent entre les différents composés sont généralement rapides et que les données les moins ambiguës concernant les NO_x s'expriment souvent comme étant la somme de tous les composés (à l'exclusion du N₂O), fréquemment appelée azote réactif total (NO_y). Il va de soi que des précautions sont à prendre pour éviter l'interférence de l'homme avec les mesures. Comme la concentration des NO_x est très faible, même aux endroits peu excentrés, il faut prendre garde à réduire au minimum la contamination pouvant être provoquée par toute forme de transport motorisé, qui est la principale source de NO_x (et également de CO et de SO₂) (United States Environmental Protection Agency, 1996).

- *Monoxyde d'azote et dioxyde d'azote*

Il est possible d'obtenir des mesures fiables du monoxyde d'azote (NO) et du dioxyde d'azote (NO₂) aux concentrations de fond avec des instruments fondés sur la chimiluminescence du NO (avec l'O₃) ou du NO₂ (en faisant indirectement appel à la chimiluminescence après transformation en NO). On peut également mesurer directement le NO₂ au moyen d'une solution lumineuse. Toutefois, les instruments vendus dans le commerce ne sont pas assez sensibles. Les détecteurs doivent être modifiés ou être du type employé pour la recherche si l'on veut mesurer de faibles concentrations.

La technique fondée sur la chimiluminescence avec l'O₃ est une méthode de mesure continue basée sur la détection des photons libérés par la réaction de l'ozone avec le monoxyde d'azote. L'air ambiant est aspiré, selon un débit contrôlé, dans une cuve à réaction au moyen d'une pompe à vide mécanique et d'un contrôleur de débit. On produit dans l'appareil de l'ozone servant de réactif, en faisant passer un courant d'oxygène pur et sec sur une électrode haute tension, et on dirige cet ozone dans la cuve à réaction où il réagit avec le NO dans le courant d'air ambiant pour former du NO₂. Une fraction du NO₂ est formée à l'état excité. Une partie de celle-ci émet un photon en revenant à l'état fondamental. Un photomultiplicateur sensible au

rouge détecte le spectre d'émission. Comme nous l'avons noté ci-dessus, le NO_2 doit être transformé en NO avant la détection. On emploie généralement du molybdène chauffé ou des surfaces en or pour transformer l'azote réactif total (NO_y) en NO. La conversion photolytique est une méthode plus sélective de mesure du NO_2 , mais elle peut souffrir de légères interférences de l'acide nitreux (HONO), du nitrate (NO_3) et du nitrate de peroxyacétyle (NPA).

On trouve dans le commerce des appareils permettant la mesure du gradient (technique de mesure des dépôts secs). Des appareils spécialement conçus ont été employés pour diverses études de la corrélation de tourbillons des émissions de NO provenant du sol (Luke et Valigura, 1997).

On peut mesurer le dioxyde d'azote directement grâce à sa réaction chimiluminescente avec une solution lumineuse. La solution s'écoule à un débit contrôlé le long d'une mèche en tissu, devant un photomultiplicateur, et des photons bleus sont émis par chimiluminescence. Il existe des versions commerciales de cet appareil qui donnent des mesures rapides et sensibles. Cependant, cette technique souffre d'une non-linéarité à des concentrations de NO_2 inférieures à 2 ou 3 ppbv et d'une interférence légère pour l' O_3 , importante pour le NPA (Luke et Valigura, 1997). Ces instruments doivent être ajustés fréquemment en vue de corriger la dérive d'étalonnage et la variation du zéro sous l'effet de la température.

• Nitrate de peroxyacétyle

Le nitrate de peroxyacétyle (NPA) se rencontre partout dans la troposphère. Il est particulièrement abondant dans l'air urbain pollué, en raison de la réactivité de nombreux hydrocarbures d'origine humaine. Il peut être transporté sur de grandes distances à basse température et être présent aux hautes latitudes. Les études du NPA sont relativement rares, alors que cette substance pourrait être importante en raison de sa phytotoxicité et de son abundance en milieu urbain. On trouvera une étude complète des sources, des puits et de la chimie atmosphérique du NPA dans Roberts (1990).

Le NPA est généralement mesuré par un chromatographe automatique en phase gazeuse équipé soit d'un détecteur à capture d'électrons, soit d'un réacteur de décomposition thermique, l'opération étant suivie d'une détection du NO_2 par chimiluminescence lumineuse. Le détecteur luminal présente l'inconvénient d'être sensible au NO_2 . Le principal problème que pose la mesure du NPA est le manque de fiabilité de l'étalonnage.

• Acide nitrique et nitrates d'aérosols

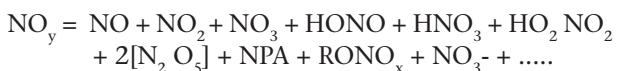
La principale espèce azotée d'origine humaine émise dans l'atmosphère est le NO, qui se transforme rapidement en NO_2 et, après plusieurs étapes, en acide nitrique (HNO_3) essentiellement. L'acide nitrique se dépose efficacement à la surface de la Terre par dépôt humide et sec. On trouvera à la section 17.2.4.1 de plus amples renseignements concernant les dépôts humides.

L'acide nitrique et les nitrates d'aérosols se prêtent à une surveillance au moyen de filtres. Une technique standard exige un train de filtres disposés en série. Le premier filtre, en Teflon, recueille les particules d'aérosols, y compris les nitrates d'aérosols. Il est suivi d'un filtre en nylon ou imprégné d'une base, qui recueille les gaz acides, dont le HNO_3 . Ces filtres sont généralement exposés pendant plusieurs heures, l'air étant échantillonné à raison de plusieurs litres à la minute. Ils sont ensuite expédiés dans un laboratoire, extraits et analysés à la recherche d'ions nitrate par chromatographie sur échangeur d'ions. Pour connaître la quantité d'air échantillonné, il faut suivre constamment le débit de pompage. Le problème le plus sérieux associé à cette technique est le risque de formation d'artefacts en raison de la collecte et de la volatilisation d'aérosols de nitrate d'ammonium. On peut éviter ce problème pour l'essentiel en fixant une durée d'échantillonnage courte (Anlauf et al., 1985; Luke et Valigura, 1997).

Il existe d'autres bonnes techniques de mesure du HNO_3 . On a eu recours à des décomposeurs, mais leur usage n'est pas aussi répandu que celui des filtres car la procédure exige beaucoup de travail (Luke et Valigura, 1997). Des techniques reposant sur des chambres de brumisation ont également été mises au point pour remplacer les filtres. Klemm et al. (1994) ont testé cette technique dans la taïga canadienne au cours d'une récente expérience sur le terrain.

• Azote réactif total

La famille des oxydes d'azote est appelée collectivement azote réactif total (NO_y) :



où NO_x désigne le NO plus le NO_2 . Chacun de ces composés a son propre comportement dans l'atmosphère et son propre rythme de dépôt. Nombre d'entre eux sont présents en quantité infime et sont difficiles à convertir quantitativement pour se prêter à une mesure sous forme de NO. On mesure le NO_y en transformant chacun de ces éléments en NO et en les mesurant en tant que composés, comme nous l'avons indiqué ci-dessus. Cette transformation s'obtient en faisant passer l'air dans un tube convertis-

seur en or tenu à 300 °C environ, en présence d'une faible quantité de CO pur ou d'hydrogène (Luke et Valigura, 1997). On peut également utiliser des écrans, fils ou tubes en molybdène chauffés (température ~ 300–350 °C), ce qui rend inutile l'ajout de CO ou d'hydrogène.

17.2.6 Propriétés chimiques des particules

Les propriétés chimiques des particules atmosphériques peuvent affecter l'environnement de nombreuses manières. Les aérosols toxiques tels que les métaux lourds (le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et l'arsenic (As), par exemple) et les particules provenant de composés organiques semivolatils (comme les biphenyles polychlorés) ont une vaste gamme d'effets néfastes sur la santé de l'homme et des animaux, y compris sur le système reproducteur, nerveux, immunitaire et endocrinien, et entraînent l'altération du fonctionnement des enzymes (United States Environmental Agency, 1997). Les aérosols hygroscopiques tels que le sel de mer, les sulfates et les particules de nitrate sont des noyaux de condensation actifs qui déterminent la concentration et la composition granulométrique des gouttelettes nuageuses, affectant ainsi la durée de vie des nuages, la nébulosité, l'albédo des nuages et le climat dans son ensemble (Parungo et al., 1992). Les aérosols hydrophobes tels que la poussière du sol et les débris biologiques en décomposition peuvent servir de noyaux glacigènes et influer ainsi sur la hauteur des précipitations. Pour mieux comprendre les tendances et l'importance des effets des aérosols sur les changements d'échelle planétaire, nous devons mesurer la variabilité dans l'espace et dans le temps des propriétés chimiques des aérosols.

La technique d'échantillonnage la plus simple et la plus directe consiste à recueillir des particules sur des filtres. Les échantillons peuvent être recueillis en une seule étape, pour une analyse en vrac, ou en plusieurs étapes en cascade, pour une répartition par grosseur. Les échantillons sont expédiés dans un laboratoire central qui procède à leur analyse chimique. Les parties solubles des particules d'aérosols peuvent être extraites à l'aide d'eau et leur concentration en cations et en anions peut être déterminée par chromatographie par échange d'ions. La composition élémentaire des particules insolubles est généralement déterminée par activation neutronique, par émission X induite par protons ou par spectrogrammétrie de masse avec plasma induit par haute fréquence. On analyse généralement les composants semivolatils par chromatographie gazeuse, à l'aide d'un détecteur à capture d'électrons ou d'un spectromètre de masse (Parungo et al., 1992; Baker, 1997).

Les opérations d'échantillonnage et d'analyse de l'ensemble des échantillons recueillis devraient, dans la mesure du possible, être standardisées sur tous les sites. Cependant, il est difficile de définir un régime d'échantillonnage pour une si vaste gamme de matières, qui présentent de fortes variations dans l'espace et dans le temps, particulièrement entre les zones urbaines et reculées. Dans de nombreuses régions urbaines et rurales, des échantillons prélevés pendant 12 h plusieurs fois par semaine permettent de bien comprendre le régime de concentration, alors qu'une exposition plus longue peut s'avérer nécessaire dans les régions reculées. Si l'on couple la concentration de filtres avec des modèles de la relation source-récepteur, il peut être indiqué d'accorder la fréquence des échantillonnages avec les exigences imposées par les conditions météorologiques (Harris et Kahl, 1990).

17.2.7 Gaz radioactifs

Les gaz radioactifs sont des gaz à l'état de trace présents dans le système atmosphérique; leur origine est naturelle et industrielle. Dans ce dernier cas, ils sont notamment produits par les centrales nucléaires, proviennent d'autres procédés industriels ou ont été dégagés lors d'anciens essais nucléaires. La concentration des divers constituants est variable. Une concentration assez élevée risque d'avoir des incidences néfastes pour l'être humain.

Le comportement des contaminants radioactifs dans l'atmosphère est régi par leurs propriétés chimiques et physiques. La dynamique du transport, de la diffusion, du dépôt et de la condensation de ces constituants est presque la même que celle de leurs équivalents non radioactifs. Il y a une exception possible à cette affirmation générale: les particules radioactives ionisent l'air ambiant et laissent des charges sur les particules, facteur qui pourrait modifier les processus qui dépendent des effets de charge. Les propriétés radioactives de radio-isotopes individuels ou d'un mélange particulier de radio-isotopes déterminent de façon sensible la quantité et la nature des matériaux radioactifs qui atteignent le récepteur, ainsi que la dose de radiation résultante (Slade, 1968).

17.2.7.1 Radon

Le radon, qui a une période radioactive de 3,82 jours, est un gaz inerte résultant de la désintégration alpha du radium. Comme les flux de radon émanant du sol sont généralement 100 fois plus intenses que ceux provenant de l'océan, le radon est utile comme traceur des masses d'air qui sont passées récemment sur les terres émergées. Des études effectuées à l'observatoire de Mauna Loa, à Hawaii, ont permis d'identifier des épisodes diurnes de transport de radon provenant de sources locales et le transport sur

de longues distances d'air provenant de continents éloignés. En association avec d'autres mesures, les données obtenues sur le radon permettent de définir des contraintes utiles pour l'évaluation des modèles de transport d'air et l'identification des conditions atmosphériques de base. En raison de la courte durée de séjour du radon dans l'atmosphère et de la vaste gamme des taux d'émanation en surface, l'interprétation des mesures du radon dépend largement du site (Liu, McAfee et Cicerone, 1984; Hansen et al., 1990).

Le radon 222 décroît par une série de cinq descendances radioactives pour donner du plomb 210, qui est relativement stable et a une période radioactive de 22 ans. Deux de ces descendances subissent une désintégration alpha. Les produits de filiation, réactifs sur le plan chimique, forment rapidement des ions hydratés complexes qui se fixent facilement sur les particules et les surfaces.

Dans un appareil de mesure du radon, l'air est généralement aspiré à travers un filtre qui élimine tous les produits de filiation ambients mais laisse passer le radon inerte. Le radon passe alors dans une grande chambre où il reste un certain temps pour que ses descendances apparaissent. Celles-ci sont recueillies sur un deuxième filtre et leur radioactivité alpha est mesurée par un détecteur à scintillation. La réponse de l'appareil dépend d'un grand nombre de facteurs tels que le débit, la géométrie de la chambre, l'efficacité avec laquelle les descendances sont captées, l'intervalle d'échantillonnage et l'efficacité du compteur. La fréquence d'échantillonnage est généralement d'un ou deux échantillons à l'heure (Thomas et LeClare, 1970).

17.2.7.2 Krypton 85

Le krypton 85 (^{85}Kr) est un gaz rare radioactif qui décroît sur une période de 10,76 ans, dégageant essentiellement des particules β ayant une énergie moyenne de 251 KeV. Les principales sources de ^{85}Kr sont les usines de retraitement des combustibles nucléaires irradiés et divers réacteurs nucléaires. Les essais nucléaires effectués entre 1945 et 1963 sont à l'origine de 5 pour cent environ du ^{85}Kr total présent dans l'atmosphère, alors que ses sources naturelles sont négligeables. La décroissance de la radioactivité est pratiquement le seul mécanisme d'élimination du ^{85}Kr de l'atmosphère. La concentration de fond actuelle dans l'atmosphère, qui est d'environ 1 Bq/ m^3 , double tous les 20 ans. Le ^{85}Kr n'est pas dangereux pour l'homme à cette concentration, mais l'ionisation de l'air produite par sa désintégration influe sur les propriétés électriques de l'atmosphère. Si la concentration de ^{85}Kr continue d'augmenter, des altérations de processus et de propriétés atmosphériques tels que la conductivité électrique de l'at-

mosphère, le courant ionique, le champ magnétique de la Terre, la formation de noyaux de condensation et d'aérosols et la fréquence de la foudre pourraient se produire et modifier le bilan thermique du globe ainsi que la configuration des précipitations. Ces conséquences exigent le suivi du ^{85}Kr (OMM, 1995b).

Pour mesurer le ^{85}Kr , on recueille des échantillons au moyen d'un filtre au charbon de bois qui est immergé dans un récipient rempli d'azote liquide. Les échantillons sont préparés par procédé chromatographique et portés à très basse température. Ils passent par un concentrateur et sont désorbés par le flux d'un support composé d'hélium. Une fois qu'il a quitté le chromatographe, le mélange est introduit dans le filtre refroidi à l'air liquide. On procède alors à une analyse radiométrique à l'aide d'un détecteur à scintillation (Novichkov, 1997).

L'exactitude nécessaire pour le ^{85}Kr dépend de l'usage qui sera fait des informations recueillies. La recherche sur l'évolution du climat a seulement besoin d'un ordre de grandeur de la concentration dans l'atmosphère. Dans ce cas, une exactitude de 10 pour cent est suffisante. En revanche, si le ^{85}Kr doit servir de traceur en vue de comprendre des processus de transport et de mélange, une exactitude de l'ordre de 1 pour cent est nécessaire. La mesure du ^{85}Kr constitue un outil intéressant pour valider ou peut-être même pour étalonner les caractéristiques de transport et de mélange à l'échelle mondiale des modèles (Novichkov, 1997).

17.3 ASSURANCE DE LA QUALITÉ

Le principal objectif du système d'assurance de la qualité de la VAG est de garantir que les relevés transmis aux centres mondiaux de données sont cohérents, conformes aux objectifs de la VAG en matière de qualité et étayés par des métadonnées complètes. Le système en place repose sur les centres d'activité scientifique chargés de l'assurance de la qualité qui doivent, entre autres choses, examiner minutieusement les mesures provenant des différentes stations. Il faut pour cela observer les procédures normalisées d'exploitation de la VAG. Selon une décision adoptée en 1999 par le Groupe d'experts du Conseil exécutif/Groupe de travail de la CSA pour la pollution de l'environnement et la chimie de l'atmosphère (OMM, 1999), les centres d'activité scientifiques chargés de l'assurance de la qualité devraient être responsables de paramètres spécifiques de l'atmosphère à l'échelle mondiale. Outre la fiabilité des mesures, les procédures d'assurance de la qualité de la VAG devraient s'intéresser à l'ensemble

du processus en tant que tel, de la formation du personnel dans les stations jusqu'à la conservation de relevés présentant la qualité voulue dans les centres mondiaux de données.

Les principes recommandés pour garantir la comparabilité et la cohérence des mesures au sein de la VAG sont les suivants (OMM, 2001) :

- a) Adoption et emploi de méthodes et de termes acceptés à l'échelle internationale pour gérer l'incertitude des mesures, selon les indications données par l'Organisation internationale de normalisation (ISO, 1993; 1995) ;
- b) Recours par toutes les stations à des techniques harmonisées de mesure reposant sur des procédures normalisées d'exploitation. Une procédure normalisée d'exploitation est un document écrit qui a reçu l'approbation officielle du groupe consultatif scientifique compétent en la matière et qui expose en détail la façon de réaliser une opération, une analyse ou une action, en stipulant toutes les techniques et les étapes en jeu ;
- c) Contrôle régulier des systèmes et de leur fonctionnement. Dans le contexte de la VAG, un contrôle du fonctionnement consiste en une vérification volontaire de la conformité d'un mesure, les critères employés étant les objectifs fixés pour le paramètre en question. S'il n'existe pas d'objectifs officiels en matière de qualité des données, le contrôle nécessite, au minimum, de s'assurer que les mesures peuvent être rapportées à l'étalon de référence. Un contrôle des systèmes se définit, de manière plus générale, par la vérification de la conformité globale d'une station avec les principes qui régissent le système d'assurance de la qualité de la VAG. La référence servant à déterminer la conformité d'une station progresse en fonction de l'évolution du système d'assurance de la qualité de la VAG.

Les buts généraux du système d'assurance de la qualité sont les suivants (OMM, 2001) :

- a) Définir des objectifs en matière de qualité des données et des procédures normalisées d'exploitation pour tous les paramètres, sur la base des recommandations faites par les groupes consultatifs scientifiques ;
- b) Désigner et établir au besoin des centres d'activité scientifique chargés de l'assurance de la qualité, des centres mondiaux d'étalonnage et des étalons de référence ;
- c) Harmoniser les procédures d'assurance de la qualité au sein de la VAG ;
- d) Accroître la fréquence des étalonnages et des comparaisons d'instruments ;
- e) Établir des alliances entre les stations mondia-

les, entre les stations régionales et entre ces deux catégories de stations (coopération scientifique et technique, jumelage), ainsi que des jumelages entre les personnes (scientifiques et personnel des stations).

La mise en œuvre comprend ce qui suit (OMM, 2001) :

- **Tâche 1** : Établir la liste des paramètres qui doivent de toute urgence être assortis d'objectifs en matière de qualité des données, classés par ordre de priorité ;
- **Tâche 2** : Désigner et établir des centres d'activité scientifique chargés de l'assurance de la qualité pour le N₂O et les CFC ;
- **Tâche 3** : Désigner et, si possible, établir des centres mondiaux d'étalonnage et des étalons de référence pour les paramètres restants ;
- **Tâche 4** : Élaborer des procédures normalisées d'exploitation pour les paramètres restants ;
- **Tâche 5** : Élaborer des lignes directrices visant le contrôle des systèmes aux stations de la VAG ;
- **Tâche 6** : Désigner et établir au besoin des centres régionaux d'étalonnage qui assurent l'étalonnage et la comparaison des instruments pour les stations de la VAG situées dans la région.

Les centres mondiaux et régionaux d'étalonnage se chargent également de tâches liées à l'assurance de la qualité pour les diverses composantes de la VAG. Ils jouent un rôle crucial en contribuant à garantir que les données communiquées aux centres mondiaux de données présentent une qualité suffisante. Leurs activités comprennent :

- a) L'étalonnage précis des instruments lors de visites aux stations ;
- b) La réalisation de campagnes d'étalonnage et de comparaison d'instruments ;
- c) La comparaison des mesures en laboratoire des échantillons de référence ou des gaz étalons en circulation ;
- d) La vérification systématique et fréquente des étalons mondiaux.

Ces activités d'étalonnage direct sont nécessaires pour s'assurer, lors des visites aux stations, que les mesures présentent toujours la comparabilité voulue. Cependant, les centres d'étalonnage de la VAG procurent aussi sur place une formation et des avis techniques afin d'aider le personnel des stations à préserver la qualité des données. Des ateliers sont organisés pendant les campagnes de comparaison et d'étalonnage. Le personnel moins expérimenté des stations qui ont été ouvertes depuis peu béné-

ficie de l'assistance du personnel de stations bien établies et avancées sur le plan technique. En outre, les centres de formation de la VAG parrainent fréquemment des cours de formation à l'intention du personnel des stations, surtout dans les pays en développement. Ces activités de renforcement des capacités revêtent d'autant plus d'importance que nombre de stations de la VAG sont entrées en service dans les pays en développement. Le système d'assurance de la qualité de la VAG reste toutefois

incomplet (OMM, 2001). Très peu de lignes directrices ont été produites à ce jour sur l'assurance de la qualité et sur les procédures normalisées d'exploitation pour le programme de la VAG, et aucun rapport de la VAG ne traite du contrôle des systèmes. On trouvera de plus amples informations sur la stratégie actuelle de mise en œuvre de la VAG sur le site de l'OMM (<http://www.wmo.int>, «Global Atmosphere Watch» sous l'onglet «Table des matières», en anglais uniquement).

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Anlauf, K.G., P. Fellin, H. Wiebe, H. Schiff, G. MacKay, R. Braman et R. Gilbert, 1985 : A comparison of three methods for measurement of atmospheric nitric acid and aerosol nitrate and ammonium. *Atmospheric Environment*, 19, p. 325-333.
- Baker, J.E. (responsable de la publication), 1997 : *Proceedings from a Session at the SETAC Fifteenth Annual Meeting* (30 octobre–3 novembre 1994, Denver, Colorado), SETAC Press, Pensacola, Floride, p. 347–377.
- Baldocchi, D.D., B.B. Hicks et T.P. Meyers, 1988 : Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, vol. 69, n° 5, p. 1331-1340.
- Bigelow, D.S., 1987 : *Siting and Sampling Characteristics of the National Atmospheric Deposition Program and the National Trends Network: Regional Influences*. Atelier EMEP sur l'analyse et la présentation des données (Cologne, République fédérale d'Allemagne, 15–17 juin 1987), Rapport EMEP-CCC 7/87, Norwegian Institute for Air Research, Lillestrom, Norvège, décembre 1987, p. 149-160.
- Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae et S.G. Warren, 1987 : Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326, p. 655-661.
- Charlson, R.J., C.B. Leovy, S.G. Warren, J. Langner et H. Rodhe, 1991 : Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. *Tellus*, 43AB, p. 152-163.
- Slusser, E.J., L.P. Steale, P.M. Lang et K.A. Masarie, 1995 : Atmospheric methane at the Mauna Loa and Barrow observatories: Presentation and analysis of in situ measurements. *Journal of Geophysical Research*, vol. 100 (D11), p. 23103-23113.
- Elkins, J.W., et al., 1996 : Airborne gas chromatograph for in situ measurements of long lived species in the upper troposphere and lower stratosphere. *Geophysical Research Letters*, vol. 23, n° 4, p. 347-350.
- Fried, A., H. Bruce et J.R. Drummond, 1993 : Tunable diode laser ratio measurements of atmospheric constituents by employing dual fitting analysis and jump scanning. *Applied Optics*, 32 (6), p. 821-827.
- Gillett, R.W. et G.P. Ayers, 1991 : The use of thymol as a biocide in rainwater samples. *Atmospheric Environment*, vol. 25, n° 12, p. 2677-2681.
- Hansen, A.D.A., R.S. Artz, A.A.P. Pszenny et R.E. Larson, 1990 : Aerosol black carbon and radon as tracers for air mass origin over the North Atlantic ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 4(2), p.189-199.
- Harris, J.M. et J.D. Kahl, 1990 : A descriptive atmospheric transport climatology for the Mauna Loa observatory using clustered trajectories. *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, n° D9, p. 13651-13667.
- Hicks, B.B., R.P. Hosker, T.P. Meyers et J.D. Womack, 1991 : Dry deposition inferential measurement techniques — I: Design and tests of a prototype meteorological and chemical System for determining dry deposition. *Atmospheric Environment*, vol. 25A, n° 10, p. 2345-2359.
- James, K.O.W., 1991 : *Quality Assurance Report*. NADP/NTN Deposition Monitoring, Laboratory Operations, Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois.
- Keene, W.C. et J.N. Galloway, 1984 : Organic acidity in precipitation of North America. *Atmospheric Environment*, vol. 18, n° 11, p. 2491-2497.
- Keene, W.C., J.N. Galloway et J.D. Holden, 1983 : Measurement of weak organic acidity in precipitation from remote areas of the world. *Journal of Geophysical Research*, 88C(9), p. 5122-5130.
- Klemm, O., R.W. Talbot, D.R. Fitzgerald, K.I. Klemm et B.L. Lefer, 1994 : Low to middle tropospheric profiles and biosphere/troposphere fluxes of acidic gases in the summertime Canadian Taiga. *Journal of Geophysical Research*, 99, p. 1687-1698.
- Kok, G. L., A.J. Schanot, P.F. Lindgren, P.K. Dasgupta, D.A. Hegg, P.V. Hobbs et J.F. Boatman, 1990 : An airborne test of three sulfur dioxide measurement techniques. *Atmospheric Environment*, 24A, p. 1903-1908.
- Komhyr, W. D., T.B. Harris, L.S. Waterman, J.F.S. Chin et K.W. Thoning, 1989 : Atmospheric carbon dioxide at the Mauna Loa Observatory. 1: NOAA global monitoring for climatic change measurements with a nondispersive infrared analyzer, 1974–1985. *Journal of Geophysical Research*, 94 (D6), p. 8533-8547.
- Liu, S.C., J.R. McAfee et R.J. Cicerone, 1984 : Radon 222 and tropospheric vertical transport. *Journal of Geophysical Research*, vol. 89 (D5), p. 7291-7297.
- Luke, W.T., 1997 : Evaluation of a commercial pulsed fluorescence detector for the measurement of low-level SO₂ concentrations during the Gas-Phase Sulfur Intercomparison Experiment. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102 (D13), p. 16255-16265.
- Luke, W.T. et R.A. Valigura, 1997 : Methodologies to estimate the air-surface exchange of atmospheric nitrogen compounds. In: Atmospheric deposition of contaminants to the Great Lakes and coastal waters (publié sous la direction de J.E. Baker). *Proceedings*

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

from a Session at the SETAC Fifteenth Annual Meeting (30 octobre–3 novembre 1994, Denver, Colorado), SETAC Press, Pensacola, Floride, p. 347–377.

- Novelli, P.C., J.E. Collins, R.C. Myers, G.W. Sachse et H.E. Scheel, 1994 : Reevaluation of the NOAA/CMDL carbon monoxide reference scale and comparisons with CO reference gases at NASA-Langley and the Fraunhofer Institut. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99 (D6), p. 12833–12839.
- Novichkov, V., 1997 : *Measurement Content of Krypton-85 in Earth Atmosphere and Validation of Global Model of Atmospheric Transport*. Conférence IGAC/SPARC/GAW sur les systèmes de mesure de la composition de l'atmosphère à l'échelle du globe (Toronto, Canada, 20–22 mai 1997).
- Organisation internationale de normalisation, 1993 : Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie. Deuxième édition, Genève.
- Organisation internationale de normalisation, 1995 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Première édition, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993 : *Global Atmosphere Watch Guide*. Rapport N° 86 de la VAG, WMO/TD-No. 553, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1995a : *Report of the Meeting of Experts on the WMO World Data Centres* (E.W. Hare). Rapport N° 103 de la VAG, WMO/TD-No. 679, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1995b : *Report of an Expert Consultation on 85Kr and 222Rn: Measurements, Effects and Applications*. Rapport N° 109 de la VAG, WMO/TD-No. 733, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1999 : *Report of the Sixth Session of the EC Panel of Experts/CAS Working Group on Environmental Pollution and Atmospheric Chemistry*. Rapport N° 135 de la VAG, WMO/TD-No. 1002, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2001 : *Strategy for the Implementation of the Global Atmosphere Watch Programme (2001–2007): A Contribution to the Implementation of the WMO Long-term Plan*. Rapport N° 142 de la VAG, WMO/TD-No. 1077, Genève.
- Parungo, F.B. Kopcewicz, C. Natgamoto, R. Schnell, P. Sheridan, C. Zhu et J. Harris, 1992 : Aerosol particles in the Kuwait oil fire plumes: Their morphology, size distribution, chemical composition, transport, and potential effect on climate. *Journal of Geophysical Research*, vol. 97 (D14), p. 15867–15882.
- Peterson, J.T. et R.M. Rosson, 1993 : *Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory. Summary Report 1992*, n° 21, Environmental Research Laboratories, Boulder, Colorado.
- Prinn, R.G., P.G. Simmonds, R.A. Rasmussen, A.J. Crawford, R.D. Rosen, F.N. Alyea, C.A. Cardelino, D.M. Cunnold, P.J. Fraser et J.E. Lovelock, 1983 : The atmospheric lifetime experiment. 1: Introduction, instrumentation, and overview. *Journal of Geophysical Research*, vol. 88 (C13), p. 8353–8367.
- Roberts, J.M., 1990 : The atmospheric chemistry of organic nitrates. *Atmospheric Environment*, 24A, p. 243–287.
- Sachse, G.W. G.F. Hill, L.O. Wade et M.G. Perry, 1987 : Fast-response, high-precision carbon monoxide sensor using a tunable diode laser absorption technique. *Journal of Geophysical Research*, vol. 92 (D2), p. 2071–2081.
- Slade, D.H. (responsable de la publication), 1968 : *Meteorology and Atomic Energy*. United States Atomic Energy Commission, Office of Information Services.
- Smith, R.A., 1872 : *Air and Rain: The Beginnings of a Chemical Climatology*. Longmans, Green and Co., Londres.
- Stecher, H.A. et al., 1997 : Results of the Gas-phase Sulfur Intercomparison Experiment (GASIE): Overview of experimental setup, results and general conclusions. *Journal of Geophysical Research*, 102, D13, p. 16219–16236.
- Thomas, J.W. et P.C. LeClare, 1970 : A study of the two-filter method for radon-222. *Health Physics*, 18(2), p. 113–122.
- United States Environmental Protection Agency, 1996 : *National Air Quality and Emissions Trends Report, 1995*. EPA-454/R-96-005, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, Caroline du Nord.
- United States Environmental Protection Agency, 1997 : *Deposition of Air Pollutants to the Great Waters: Second Report to Congress*. EPA-453/R-97-011, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, Caroline du Nord.
- Weeks, I.A., I.E. Galbally, P.J. Fraser et G. Mathews, 1989 : Comparison of the carbon monoxide standards used at Cape Grim and Aspendale. *Baseline Atmospheric Program 1987* (publié sous la direction de B.W. Forgan et G.P. Ayers). Australian Government Department of Science and Technology, Canberra, Australie, p. 21–25.

PARTIE II

SYSTÈMES D'OBSERVATION

PARTIE II. SYSTÈMES D'OBSERVATION

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
CHAPITRE 1. MESURES AUX STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES AUTOMATIQUES	II.1-1
1.1 Généralités	II.1-1
1.2 Matériel d'une station météorologique automatique	II.1-4
1.3 Logiciel d'une station météorologique automatique	II.1-11
1.4 Choix d'un site pour une station météorologique automatique	II.1-19
1.5 Traitement de données par un système central de gestion de réseau	II.1-20
1.6 Maintenance	II.1-21
1.7 Étalonnage	II.1-22
1.8 Formation	II.1-23
Références et autres lectures	II.1-24
CHAPITRE 2. MESURES ET OBSERVATIONS AUX STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES AÉRONAUTIQUES	II.2-1
2.1 Généralités	II.2-1
2.2 Vent de surface	II.2-3
2.3 Visibilité	II.2-4
2.4 Portée visuelle de piste	II.2-6
2.5 Temps présent	II.2-10
2.6 Nuages	II.2-10
2.7 Température de l'air	II.2-12
2.8 Point de rosée	II.2-12
2.9 Pression atmosphérique	II.2-12
2.10 Autres renseignements importants aux aérodromes	II.2-14
2.11 Systèmes d'observations météorologiques automatiques	II.2-15
2.12 Radar	II.2-16
2.13 DéTECTeur de verglas	II.2-16
2.14 Détection des éclairs	II.2-16
2.15 Autres observations pertinentes	II.2-17
Références et autres lectures	II.2-18
CHAPITRE 3. OBSERVATIONS D'AÉRONEFS	II.3-1
3.1 Généralités	II.3-1
3.2 Pression et nombre de mach	II.3-2
3.3 Température de l'air	II.3-4
3.4 Vitesse et direction du vent	II.3-5
3.5 Turbulence	II.3-7
3.6 Humidité relative	II.3-9
3.7 Dégivrage	II.3-9
3.8 Systèmes pratiques opérationnels	II.3-9
3.9 Futurs systèmes AMDAR	II.3-10
Références et autres lectures	II.3-11
CHAPITRE 4. OBSERVATIONS MARITIMES	II.4-1
4.1 Généralités	II.4-1
4.2 Observations à partir de navires	II.4-2
4.3 Bouées ancrées	II.4-18

	<i>Page</i>
4.4 Bâteaux-feux non gardés	II.4-23
4.5 Tours et plates-formes	II.4-24
4.6 Bouées dérivantes	II.4-24
Annexe 4.A. Centres régionaux OMM/COI d'instruments maritimes	II.4-26
Annexe 4.B. Description des précipitations à l'usage des observateurs à bord de navires	II.4-28
Références et autres lectures	II.4-30
 CHAPITRE 5. TECHNIQUES SPÉCIALES D'OBTENTION DE PROFILS DE LA COUCHE LIMITE ET DE LA TROPOSPHÈRE	II.5-1
5.1 Généralités	II.5-1
5.2 Techniques de télédétection à partir du sol	II.5-1
5.3 Mesures in situ	II.5-7
Références et autres lectures	II.5-11
 CHAPITRE 6. MESURES EFFECTUÉES DANS LA STRATOSPHÈRE ET LA MÉSOSPHERE À L'AIDE DE FUSÉES	II.6-1
6.1 Généralités	II.6-1
6.2 Mesures du vent	II.6-1
6.3 Mesure de la température par thermométrie d'immersion	II.6-3
6.4 Mesure de la température au moyen d'une sphère gonflable à chute libre	II.6-5
6.5 Calcul des autres variables aérologiques	II.6-6
6.6 Réseaux et comparaisons	II.6-7
Références et autres lectures	II.6-8
 CHAPITRE 7. LOCALISATION DES SOURCES D'ATMOSPHÉRIQUES	II.7-1
7.1 Généralités	II.7-1
7.2 Localisation des éclairs par radiogoniométrie	II.7-3
7.3 Exemples de systèmes de localisation par les instants d'arrivée (TOA)	II.7-6
7.4 Comparaisons entre les réseaux radiogoniométriques et TOA	II.7-7
7.5 Emploi combiné des deux techniques	II.7-8
7.6 Présentation et diffusion des données	II.7-9
Références et autres lectures	II.7-10
 CHAPITRE 8. OBSERVATIONS SATELLITAIRES	II.8-1
8.1 Généralités	II.8-1
8.2 Systèmes à satellites opérationnels	II.8-3
8.3 Observations météorologiques	II.8-9
8.4 Installations et moyens connexes	II.8-32
Annexe 8.A. Canaux du radiomètre perfectionné à très haute résolution	II.8-36
Annexe 8.B. Canaux Hirs et leurs applications	II.8-37
Références et autres lectures	II.8-38
 CHAPITRE 9. MESURES RADAR	II.9-1
9.1 Généralités	II.9-1
9.2 Technique du radar	II.9-4
9.3 Propagation et diffusion des signaux radar	II.9-12
9.4 Mesures de vitesses	II.9-14
9.5 Sources d'erreurs	II.9-16
9.6 Optimisation des caractéristiques des radars	II.9-17
9.7 Installation d'un radar	II.9-19
9.8 Étalonnage et entretien	II.9-21

TABLE DES MATIÈRES

II.3

	<i>Page</i>
9.9 Mesure des précipitations	II.9-22
9.10 Détection de phénomènes météorologiques extrêmes et applications aux prévisions immédiates	II.9-27
9.11 Radars haute fréquence pour les mesures à la surface des océans	II.9-29
Annexe. Énoncé de recommandations de l'OMM sur le choix de l'emplacement des radars météorologiques/éoliennes	II.9-30
Références et autres lectures	II.9-32
 CHAPITRE 10. TECHNIQUES D'OBSERVATION PAR BALLONS-MÉTÉOROLOGIQUES	II.10-1
10.1 Généralités	II.10-1
10.2 Comportement des ballons	II.10-2
10.3 Manipulation des ballons	II.10-3
10.4 Accessoires	II.10-5
10.5 Gaz utilisés pour gonfler les ballons	II.10-5
10.6 Précautions à prendre dans l'utilisation de l'hydrogène	II.10-7
Références et autres lectures	II.10-10
 CHAPITRE 11. OBSERVATIONS URBAINES	II.11-1
11.1 Généralités	II.11-1
11.2 Choix de l'emplacement et du site pour implanter une station urbaine	II.11-6
11.3 Exposition des instruments	II.11-9
11.4 Métadonnées	II.11-22
11.5 Évaluation des effets urbains	II.11-25
11.6 Résumé des points importants à respecter dans les stations urbaines	II.11-25
Références et autres lectures	II.11-27
 CHAPITRE 12. MESURES DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRE	II.12-1
12.1 Généralités	II.12-1
12.2 Implantation d'une station de météorologie routière	II.12-2
12.3 Variables observées	II.12-2
12.4 Choix des équipements d'une station de météorologie routière	II.12-5
12.5 Chiffrement des messages	II.12-7
12.6 Ordinateur central de commande et d'acquisition des données	II.12-7
12.7 Communications	II.12-7
12.8 Traitement des signaux émis par les capteurs et génération d'alarmes	II.12-8
12.9 Contrôle qualité des mesures	II.12-8
12.10 Maintenance des stations de météorologie routière	II.12-9
12.11 Formation	II.12-10
Références et autres lectures	II.12-11

CHAPITRE 1

MESURES AUX STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES AUTOMATIQUES

1.1 GÉNÉRALITÉS

1.1.1 Définition

Selon le Vocabulaire météorologique international (OMM-N° 182), une station météorologique automatique est une « station météorologique où les observations sont effectuées et transmises automatiquement ».

Une station météorologique automatique est équipée d'une unité centrale d'acquisition des données qui lit ou reçoit les mesures effectuées par les instruments. Les données fournies par les appareils de mesure autonomes, une fois recueillies de cette manière, sont traitées soit sur place, à la station météorologique automatique, soit ailleurs, par le concentrateur central du réseau par exemple (OMM-N° 488). Les stations météorologiques automatiques peuvent être conçues comme un système intégré d'appareils de mesure divers comprenant une unité d'acquisition des données et une unité de traitement des données. On fait habituellement référence à un tel ensemble d'instruments, d'interfaces et d'unités de traitement et de transmission en parlant de «système automatique d'observation météorologique» ou encore de «système d'observation automatique en surface». L'usage a voulu que s'impose l'expression «station météorologique automatique», alors qu'il ne s'agit pas, par définition, d'une «station» à part entière. Dans le présent chapitre, l'expression en question, souvent abrégée en «station automatique» couvre cette notion de système.

1.1.2 Objet

Les stations météorologiques automatiques servent à accroître le nombre et la fiabilité des observations en surface. Elles permettent en effet :

- a) D'augmenter la densité d'un réseau existant en produisant des données en provenance de nouveaux sites et de sites difficiles d'accès et inhospitaliers ;
- b) De produire, dans le cas des stations pourvues de personnel, des données en dehors des heures normales de travail ;
- c) D'accroître la fiabilité des mesures grâce à l'emploi de technologies perfectionnées et de techniques de mesure numériques modernes ;
- d) D'assurer l'homogénéité des réseaux par une normalisation des techniques de mesure ;

- e) De répondre à de nouveaux besoins et exigences en matière d'observation ;
- f) De réduire les erreurs humaines ;
- g) D'abaisser les coûts d'exploitation en limitant le nombre d'observateurs ;
- h) D'exécuter des mesures et de transmettre les données à une fréquence élevée, voire en continu.

1.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

Les besoins généraux, les types, l'endroit, la composition, la fréquence et le moment des observations sont déterminés dans les publications OMM-N° 49 et OMM-N° 544.

Si l'on admet que les stations automatiques sont réellement des stations météorologiques lorsqu'elles produisent des données d'une exactitude comparable à celle des stations traditionnelles, les exigences en matière d'exactitude énoncées dans le chapitre 1 de la Partie I du présent Guide s'appliquent également aux stations météorologiques automatiques.

Le texte du présent chapitre doit être considéré parallèlement aux chapitres de la Partie I portant sur la mesure des divers éléments météorologiques et, en particulier, aux chapitres 1, 2 et 3 de la Partie III portant respectivement sur la gestion de la qualité, l'échantillonnage et la réduction des données.

La création et l'implantation de stations météorologiques automatiques devraient faire l'objet d'un plan coordonné très précis visant à garantir que les utilisateurs reçoivent les données nécessaires sous la forme voulue. Il faudrait pour cela commencer par consulter les usagers afin de dresser une liste de l'ensemble des besoins fonctionnels et de définir des moyens pratiques de les satisfaire.

Il n'est pas toujours satisfaisant de se fier aux fournisseurs de matériel pour déterminer les contraintes d'exploitation. La Commission des instruments et des méthodes d'observation donne les conseils suivants aux Membres de l'OMM et, en conséquence, à tout Service qui procède à des mesures météorologiques.

Lorsqu'ils envisagent la mise en œuvre de nouveaux systèmes de mesure dans des stations météorologi-

ques automatiques, les Services météorologiques devraient¹ :

- a) Ne mettre en service que des systèmes pour lesquels ils disposent d'une documentation suffisamment précise en ce qui concerne les possibilités et les caractéristiques de ces systèmes ainsi que les algorithmes utilisés ;
- b) Retenir ou développer l'expertise technique leur permettant de définir les systèmes qui leur conviennent et de déterminer si les possibilités, caractéristiques techniques et algorithmes de ces systèmes correspondent bien à leurs besoins² ;
- c) Étudier minutieusement les besoins des utilisateurs et associer ces derniers à la conception des systèmes automatiques ;
- d) Associer les utilisateurs à la validation et à l'évaluation des nouveaux systèmes automatiques ;
- e) Associer les fabricants à l'évaluation des systèmes et à l'amélioration de leur fonctionnement ;
- f) Élaborer des guides et une documentation détaillés à l'intention de tous les utilisateurs ;
- g) Élaborer des programmes appropriés pour la maintenance et l'étalonnage des stations météorologiques automatiques ;
- h) Consulter les utilisateurs, tels que les organes aéronautiques, et collaborer avec eux, notamment de la conception des stations météorologiques automatiques à leur exploitation proprement dite ;
- i) Concevoir et appliquer des méthodes de transmission adaptées aux observations effectuées à l'aide de systèmes classiques et de systèmes automatiques.

Les Services météorologiques sont priés aussi d'affiner la définition de leurs besoins en matière d'automatisation des observations visuelles et subjectives classiques, et sur les évolutions des codes de transmission, notamment en ce qui concerne³ :

- a) Les domaines d'application pour lesquels ils n'ont plus besoin de données ;
- b) Les domaines d'application pour lesquels ils ont besoin de données nouvelles ou différentes ;
- c) La définition d'un ordre de priorité s'agissant des données que doivent fournir les stations météorologiques automatiques.

Lorsqu'ils envisagent l'élaboration et l'application d'algorithmes destinés aux stations météorologi-

¹ Recommandations 2 et 4 (CIMO-XII) formulées par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa douzième session (1998).

² Recommandation 2 (CIMO-XII) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa douzième session (1998).

³ Recommandation 5 (CIMO-XII) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa douzième session (1998).

ques automatiques, les Services météorologiques devraient⁴ :

- a) Inciter les concepteurs d'instruments et de systèmes à travailler en collaboration étroite avec les utilisateurs afin de bien cerner les besoins et les problèmes de ceux-ci ;
- b) Coopérer avec les concepteurs d'instruments et de systèmes afin qu'ils publient et diffusent, pour un large usage et dans l'optique d'une éventuelle normalisation, des descriptions des algorithmes de traitement de données employés dans les systèmes pour calculer les variables météorologiques ;
- c) Faire des tests rigoureux sur les nouveaux algorithmes et systèmes afin de les évaluer et diffuser les résultats des tests sous forme de caractéristiques de fonctionnement à l'intention des utilisateurs des observations ;
- d) Évaluer avec soin, en procédant à des essais sur le terrain et à des comparaisons, le rapport entre les nouveaux algorithmes et systèmes et les méthodes d'observation utilisées jusque-là, établir les fonctions de transfert qui assureront la continuité et l'homogénéité des données et en informer les usagers.

1.1.4 Besoins dans le domaine de la climatologie⁵

Dans le cadre d'un projet d'installation d'une station automatique qui devra servir notamment à fournir des données destinées à alimenter les relevés climatologiques et afin de garantir l'intégrité, l'homogénéité et l'utilité des jeux de données climatologiques, il importe de prendre les mesures qui suivent (voir OMM-N° 305) :

- a) Quand une station automatique doit remplacer un système d'observation manuel en service depuis longtemps, il faut veiller à l'aménagement d'une période transitoire de fonctionnement en parallèle des deux systèmes devant permettre de garantir l'homogénéité des relevés chronologiques⁶. La durée de cette période est fonction des différentes variables mesurées et du climat du lieu. Dans les régions tropicales et dans les îles, la période peut être plus courte que dans les régions extratropicales et dans les régions montagneuses. Voici les durées suffi-

⁴ Recommandation 2 (CIMO-XII) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa douzième session (1998).

⁵ Recommandation 3 (CIMO-XII) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa douzième session (1998).

⁶ Voir aussi l'alinéa c de la section 3.2.1.4.4.4, OMM-N° 488 : «Une année de mesures parallèles est insuffisante, une période d'au moins deux ans est préférable, la durée souhaitable dépendant toutefois de la région climatique».

santes proposées pour une période de fonctionnement parallèle en exploitation entre le système en place et un nouveau système automatisé :

- Vitesse et direction du vent – 12 mois,
- Température, humidité, insolation, évaporation – 24 mois,
- Précipitations – 60 mois.

(Il est conseillé d'installer un ombromètre pour qu'il fonctionne en parallèle avec le pluviomètre automatique).

Une période de transition de 24 mois (deux cycles saisonniers) apparaît comme un compromis satisfaisant.

- b) Il y a lieu de tenir à jour des métadonnées précises sur toutes les stations météorologiques automatiques⁷.
- c) Il y a lieu de normaliser les procédures d'assurance de la qualité et de traitement des données émanant des stations météorologiques automatiques (voir section 1.3.2.8).
- d) Il y a lieu de définir avec précision les besoins actuels et futurs des utilisateurs de données climatologiques et d'en tenir compte dans les spécifications des observations automatisées que doivent exécuter les stations météorologiques automatiques⁸.
- e) Il y a lieu de former les utilisateurs du domaine de la climatologie à l'emploi optimal des données des stations météorologiques automatiques⁹.
- f) Il y a lieu d'établir les spécifications normalisées d'une station climatologique automatique type pour l'observation des variables climatiques essentielles, notamment la température, les précipitations, la pression et le vent. Il faudrait y ajouter aussi la mesure de la vapeur d'eau, compte tenu de l'importance de ce paramètre dans les études de l'évolution du climat. Il importe d'enregistrer les valeurs extrêmes de toutes les variables avec exactitude et de manière cohérente, afin de garantir la continuité avec les données découlant de relevés plus anciens effectués par des observateurs¹⁰.

1.1.5 Types de stations météorologiques automatiques

Les stations météorologiques automatiques répondent à divers besoins allant d'une aide aux observateurs dans le cas des stations pourvues de personnel, au remplacement intégral des observateurs dans le cas

des stations entièrement automatiques. Il est possible de classer les stations automatiques en divers groupes fonctionnels, mais une telle classification devient vite impraticable du fait que ces groupes se chevauchent fréquemment. Il est possible en revanche d'établir un classement général en stations qui produisent des données en temps réel et en stations qui enregistrent des données en vue d'une analyse en différé ou hors ligne. Il n'est pas rare, cependant, qu'une même station automatique assure ces deux fonctions.

- *Station automatique produisant des données en temps réel* : station qui fournit aux utilisateurs d'observations météorologiques des données en temps réel, en général à des moments prédéterminés, mais aussi en cas d'urgence ou sur demande émanant de l'extérieur. Des utilisations caractéristiques en temps réel seraient la production de données à usage synoptique et le suivi de situations critiques telles que tempêtes, niveau des cours d'eau et hauteur des marées.
- *Station automatique produisant des données en différé* : Station qui enregistre les données sur place, sur des supports informatiques internes ou externes, avec affichage éventuel des données. L'intervention d'un observateur est nécessaire pour transmettre les données mémorisées aux utilisateurs distants. Les stations de ce type sont en général des stations climatologiques ou des stations fournissant simplement une aide aux observateurs.

Il est possible d'équiper ces deux types de stations de moyens permettant d'introduire et de corriger manuellement des observations visuelles ou subjectives ne pouvant être effectuées de façon entièrement automatique, par exemple les observations du temps présent et du temps passé ou les observations très coûteuses, notamment la hauteur des nuages et la visibilité. On peut qualifier ces stations de partiellement automatiques ou de semi-automatiques.

Le coût d'une station automatique pouvant être très élevé, il est possible d'utiliser les installations d'une telle station à diverses fins pour répondre aux exigences et aux besoins communs et spécifiques de plusieurs applications, telles que la météorologie, l'hydrologie et la climatologie synoptiques, aéronautiques et agricoles. On peut aussi s'en servir pour remplir des fonctions relevant de domaines particuliers tels que la sécurité des centrales nucléaires, le contrôle de la qualité de l'air et de l'eau et la météorologie routière. Certaines stations automatiques sont ainsi des stations polyvalentes.

1.1.6 Mise en réseau

Une station météorologique automatique fait généralement partie d'un réseau de stations météorologi-

⁷ Voir la section 1.1.3 du chapitre 1, Partie I.

⁸ Voir annexe 1.B, chapitre 1, Partie I.

⁹ Voir par exemple OMM-N° 862, en particulier la Partie II intitulée *Implementation and user training considerations*.

¹⁰ Ibid.

ques qui transmettent chacune des données traitées à un système central de gestion de réseau en passant par divers moyens de transmission. Comme les tâches à exécuter par ce système de concentration sont intimement liées aux tâches des stations automatiques, dont elles sont souvent complémentaires, les spécifications fonctionnelles et techniques du concentrateur central et des stations automatiques devraient être bien coordonnées.

Lorsqu'on planifie la mise en place et l'exploitation d'un réseau de stations automatiques, il est de la plus grande importance d'envisager les divers problèmes que posent les installations de maintenance et d'étalonnage et leur organisation, ainsi que la formation du personnel technique. Les considérations relatives à la densité des réseaux, qui dépendent des applications mises en œuvre, ne relèvent pas du présent Guide. Par ailleurs, la sélection des sites et l'exposition des stations ont une influence considérable sur les performances des stations et doivent être étudiées avant l'installation.

1.2 MATÉRIEL D'UNE STATION MÉTÉOROLOGIQUE AUTOMATIQUE

Une station météorologique automatique peut se composer d'un système automatique d'observation météorologique (y compris un système d'acquisition de données) ou alors d'un ensemble d'appareils de mesure autonomes reliés à une unité de collecte et de transmission des données. Voici en quoi consiste le schéma type d'une station météorologique automatique :

- a) Sur une aire d'observation standard, dont les dimensions ne devraient pas être inférieures à 25 m de côté (chapitre 1, Partie I et OMM-N° 488), une série de capteurs automatiques installés suivant des emplacements recommandés, ces capteurs étant reliés à une ou plusieurs unités de collecte de données à l'aide d'interfaces ou, dans le cas d'un système automatique d'observation météorologique, un ensemble de capteurs groupés, sans effet l'un sur l'autre, directement reliés à une unité centrale par des câbles blindés, des fibres optiques ou des liaisons radio ;
- b) Une unité centrale qui permet l'acquisition des données émanant des capteurs et leur conversion sous une forme assimilable par ordinateur, leur traitement correct au moyen d'un système piloté par microprocesseur, selon des algorithmes définis, leur stockage temporaire et leur transmission à des utilisateurs de l'information météorologique situés à distance ;
- c) Des périphériques tels qu'une source d'énergie électrique stabilisée alimentant les divers éléments

de la station, une horloge temps réel et un matériel de contrôle intégré permettant de vérifier l'état des organes essentiels de la station. S'ajoutent à cela, en vue d'applications spécifiques, des terminaux locaux permettant d'introduire manuellement et de corriger des données, des écrans de visualisation et des imprimantes ou des appareils enregistreurs.

Les interactions de plus en plus nombreuses entre la société et l'atmosphère conduisent à une évolution des besoins : demande d'un plus grand nombre de stations et de variables à mesurer, transmissions plus fréquentes, nouvelles formes de présentation des données et meilleures performances. Le matériel et les logiciels existants doivent ainsi être adaptés à de nouvelles exigences. Cela ne peut se faire que si les stations automatiques sont bien conçues sur une base modulaire. Les adaptations et les essais sont souvent plus complexes que prévu. Une station automatique bien conçue comporte des fonctions pré établies qui permettent de modifier la configuration et les paramètres du système. D'autres caractéristiques souhaitables sont une possibilité d'alimentation de secours, de l'espace disponible dans les armoires d'installation, des interfaces de communication en réserve, une capacité inexploitée de traitement et un environnement logiciel adaptable. La Partie I de la publication OMM/TD-N° 862 fournit des conseils sur la façon d'établir les spécifications relatives au fonctionnement des stations météorologiques automatiques.

1.2.1 Capteurs

Les caractéristiques météorologiques exigées des capteurs employés dans des stations automatiques ne sont pas très différentes de celles des capteurs équipant les stations d'observation dotées de personnel. Il convient de se reporter à ce sujet aux recommandations figurant dans les chapitres pertinents de la Partie I du présent Guide. Les mesures exécutées par la plupart des stations automatiques étant commandées à distance, les capteurs doivent être robustes, relativement sans entretien et dépourvus de défauts intrinsèques qui puissent engendrer des erreurs systématiques ou des incertitudes dans l'échantillonnage des variables à mesurer. De façon générale, les capteurs qui conviennent sont ceux qui produisent des signaux électriques. Un grand nombre de capteurs de performance et de qualité variable (ainsi que leur coût) fonctionnent correctement avec des systèmes automatiques d'acquisition de données. Les progrès sont fréquents : certains améliorent les performances de capteurs existants alors que d'autres sont souvent fondés sur de nouveaux principes physiques. Selon leurs caractéristiques de sortie, les capteurs peuvent être classés en capteurs analogiques, numériques ou intelligents.

- *Capteurs analogiques* : Capteurs produisant un signal de sortie le plus souvent sous la forme d'une tension, d'une intensité, d'une charge, d'une résistance ou d'une capacité. Les signaux de base sont traités pour être convertis en tension.
- *Capteurs numériques* : Capteurs produisant un signal numérique dont l'information est contenue dans un bit ou dans un groupe de bits, ou des impulsions ou une fréquence.
- *Capteurs intelligents* : capteurs comprenant un microprocesseur qui assure les fonctions essentielles d'acquisition et de traitement des données et qui produisent un signal numérique véhiculé en série ou en parallèle.

Au sujet des capteurs météorologiques, on trouvera dans la Partie I du présent Guide une description complète de l'aspect général et des types de capteurs, des techniques de mesure, des unités, des échelles, de l'exposition, des sources d'erreur, de l'étalonnage et de l'entretien. La CIMO vient en aide aux Membres en organisant régulièrement des comparaisons internationales d'instruments. Les résultats de ces comparaisons peuvent être intéressants pour évaluer les diverses techniques de mesure. Depuis 1968, la CIMO fait appel à des questionnaires pour obtenir des renseignements sur la mise au point d'instruments; elle publie tous les quatre ans un rapport ayant pour titre *Instrument Development Inquiry*. Ce rapport contient des informations sur les instruments en cours de mise au point et sur ceux mis en service. On trouvera des renseignements sur les éléments nouveaux et sur les leçons tirées de l'exploitation dans les comptes rendus de colloques nationaux, dans des revues et des magazines, ainsi que dans les comptes rendus des conférences techniques organisées régulièrement par la CIMO. Ces conférences techniques s'accompagnent d'expositions d'instruments météorologiques où les constructeurs présentent leurs dernières créations. Les résultats des comparaisons organisées par la CIMO, les rapports *Instrument Development Inquiry* et les comptes rendus des conférences techniques de la CIMO sont publiés par l'OMM dans la série des rapports consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation. Il est recommandé, afin d'obtenir davantage d'informations, de procéder à un échange direct d'éléments d'expérience entre opérateurs de réseaux de stations météorologiques automatiques, surtout parmi ceux qui exploitent des stations dans des conditions semblables.

On trouvera ci-après quelques indications précises concernant les capteurs destinés aux stations météorologiques automatiques. L'exactitude des mesures que l'on peut obtenir dans des conditions d'explo-

tation est indiquée dans l'annexe 1.B¹¹ du chapitre 1 de la Partie I de ce Guide. Les valeurs figurant dans cette annexe sont mises à jour au besoin au fur et à mesure que la CIMO dispose de nouveaux résultats expérimentaux dans le domaine. L'exactitude de calibrage devrait être améliorée par un facteur au moins égal à 2 en tenant compte de la transformation linéaire de la courbe de réponse. La résolution des capteurs devrait être trois fois meilleure environ que les valeurs requises (ce qui inclut les performances de l'interface).

- *Pression atmosphérique* : Il existe une grande variété d'appareils, fondés pour la plupart sur l'emploi d'une capsule anéroïde, d'un fil vibrant ou d'un quartz, qui fournissent un signal électrique de sortie sous forme analogique ou numérique. On peut se référer à la publication OMM/TD-N° 474 en ce qui concerne les capteurs numériques. Concevoir une station automatique et établir ses spécifications sont des tâches qui exigent une mûre réflexion au sujet des principaux problèmes que constituent les effets néfastes de la température, de la dérive à long terme, des vibrations et de l'exposition. Les effets de la température sont importants et ne sont pas toujours entièrement compensés par des circuits intégrés à cet effet. Les capteurs de pression, dont l'exactitude subit une dérive intrinsèque à long terme, en général de 0,2 à 0,3 hPa sur six mois, nécessitent un étalonnage régulier. Les effets des vibrations et des chocs mécaniques sur les résultats produits par les capteurs de pression sont importants, surtout dans le cas des applications maritimes des stations météorologiques automatiques. En raison de la vulnérabilité de la plupart des capteurs de pression d'emploi courant aux effets d'une exposition aux éléments extérieurs, il est courant d'enfermer ceux-ci dans un petit boîtier étanche et thermostabilisé se trouvant à l'intérieur de l'enceinte de l'unité centrale. Dans certains pays, le capteur est relié à l'extérieur du boîtier par un tube muni d'une tête de pression statique. Pour les applications aéronautiques ou dans les stations isolées, conditions nécessitant un niveau élevé d'exactitude et de fiabilité, les stations sont équipées d'au moins deux capteurs de pression.

On trouvera dans le chapitre 3 de la Partie I des directives sur l'emploi de baromètres numériques dans les stations météorologiques automatiques.

- *Température* : Les thermomètres les plus couramment utilisés dans les stations météorologiques automatiques sont des thermomètres à thermistance ou à

¹¹ Rédigée lors de la Réunion du Groupe d'experts des besoins en matière d'exactitude pour l'exploitation (1991) et dont l'inclusion dans cette édition a été approuvée lors de la quarante-quatrième session du Conseil exécutif (1992).

résistance électrique en métal pur. Les thermomètres à résistance en platine (100Ω à 0°C) ont une excellente stabilité à long terme et peuvent être considérés comme des capteurs de premier choix.

Les thermomètres électriques ont en général une constante de temps courte. Lorsqu'on les échantillonne au moyen de circuits électroniques rapides, à la faible variation d'amplitude du signal liée à la variation de température, se rajoutent des fluctuations de haute fréquence. Pour éviter ce problème, on peut employer des capteurs ayant une constante de temps longue ou amortir artificiellement leur réponse au moyen d'un circuit approprié afin d'allonger la constante de temps du signal de sortie, ou encore établir numériquement la moyenne des signaux de sortie échantillonnés dans l'unité centrale. Il est nécessaire de linéariser les thermomètres à résistance. Cela peut se faire au moyen de circuits appropriés intégrés dans les modules de conditionnement des signaux ou par des algorithmes logiciels. Il est vivement recommandé de linéariser la caractéristique des thermistances. La protection des capteurs contre les effets du rayonnement est d'une grande importance. Des écrans de protection contre le rayonnement adaptés à la taille des capteurs sont largement utilisés et, dans les stations météorologiques automatiques, remplacent les abris de Stevenson à ventilation naturelle. Pour obtenir des mesures exactes, il faut ventiler artificiellement les écrans avec de l'air circulant à une vitesse d'environ 3 m s^{-1} , en veillant cependant à bien éviter que des aérosols et la bruine se déposent sur le capteur et créent les conditions d'un thermomètre mouillé.

- **Humidité :** On trouvera dans la publication OMM/TD-N° 316 une description très complète des capteurs d'humidité employés dans les stations météorologiques automatiques.

Des capteurs à résistance et capacitifs d'un prix relativement faible, qui mesurent directement l'humidité relative, sont largement employés dans les stations automatiques, mais leurs performances risquent toujours d'être détériorées par la présence de polluants, d'où la nécessité de filtres spéciaux de protection. Des comparaisons ont permis d'établir qu'il faut procéder à des corrections supplémentaires pour les mesures effectuées au-dessous de 0°C , même si les capteurs sont équipés de circuits de compensation de la température, et que des problèmes d'hystéresis se produisent en cas de saturation.

Des détecteurs de point de rosée tels que les détecteurs à chlorure de lithium saturé et les détecteurs à miroir refroidi sont également employés dans les stations automatiques. Le principal inconvénient des détecteurs à chlorure de lithium est leur sensibilité aux pannes de courant : Une interruption d'alimentation nécessite une intervention sur place. Les détecteurs de point de rosée optiques sont considérés comme les plus prometteurs, mais il faut poursuivre les recherches afin de mettre au point un dispositif de bonne qualité permettant le nettoyage automatique du miroir.

Les problèmes que pose la faible valeur de la constante de temps sont encore plus graves dans le cas des capteurs d'humidité que dans celui des capteurs de température. Comme les thermomètres, les capteurs d'humidité de tout type doivent être installés derrière des écrans de protection contre le rayonnement. Il faut donner la préférence à des écrans à ventilation forcée de construction semblable à ceux employés pour la mesure de la température. Des erreurs sensibles sont possibles du fait de problèmes d'aspiration et de nettoyage.

- **Vent :** L'emploi d'anémomètres ordinaires à coupelles ou à hélice produisant des impulsions ou une fréquence est courant et ne pose pas de problèmes techniques particuliers autres que ceux imputables au givrage dans des conditions extrêmes. Ces problèmes peuvent être résolus en chauffant l'anémomètre dans des conditions de givrage modéré, mais au prix d'une nette augmentation de la consommation d'énergie. Il est recommandé, pour les nouveaux anémomètres à coupelles ou à hélice, d'établir une constante de distance inférieure à 5 m et, dans les nouveaux systèmes numériques, de rendre la fréquence d'échantillonnage compatible avec le filtrage appliqué. Dans les appareils totalisateurs, cela suppose que le nombre d'impulsions par intervalle de comptage soit considéré comme un échantillon.

L'emploi d'appareils analogiques usuels équipés d'un potentiomètre pour la mesure de la direction du vent est également courant dans les stations automatiques. Des appareils à girouette équipés de codeurs d'angle numériques, en général dans l'une des versions du code Gray, sont de plus en plus employés. Il est recommandé que les girouettes aient une constante de distance fondamentale entretenue inférieure à 10 m et un rapport d'amortissement compris entre 0,3 et 0,7. Dans le cas des girouettes équipées de codeurs numériques, il faut une résolution minimale de sept bits.

La CIMO recommande également que dans le cas de nouveaux systèmes, il soit possible d'obtenir les écarts types de la vitesse et de la direction du vent avec une résolution de $0,1 \text{ m s}^{-1}$ et de 10° respectivement.

On se sert fréquemment, comme capteur intelligent, d'un système de mesure du vent produisant un signal numérique transmis en série et équipé d'un

ou de plusieurs écrans d'affichage numérique qui permettent de visualiser directement les variables opérationnelles (pics de vent, moyennes sur 2 et 10 min, direction du vent et extrêmes).

- *Précipitations* : Le matériel de mesure des précipitations le plus couramment utilisé dans les stations météorologiques automatiques est le pluviomètre à augets basculeurs. Les pluviomètres de ce type sont rapidement souillés par les feuilles d'arbres, le sable, les fientes d'oiseaux, etc. Il faut donc les installer soigneusement dans les stations automatiques rarement visitées. Il convient de chauffer correctement les diverses parties des pluviomètres qui fonctionnent au-dessous de 0 °C, ce qui risque de provoquer de sérieux problèmes d'alimentation électrique dans le cas des stations automatiques alimentées par batterie. Il faut prendre garde, dans le cas des pluviomètres chauffés, aux erreurs dues aux pertes par évaporation. Une exactitude d'observation de 5 à 10 % est considérée comme excellente. On peut améliorer l'exactitude d'un pluviomètre en l'entourant d'un pare-vent adapté (par exemple un écran Nipher). On trouvera dans la publication OMM/TD-N° 588 une comparaison de divers pluviomètres.

- *Insolation* : Il existe divers types d'appareils qui enregistrent la durée d'insolation pour la transformer en signaux électriques. On peut, à cet égard, se référer à la publication OMM/TD-N° 303. L'OMM a adopté un seuil de 120 W m⁻² d'insolation effective pour l'éclairement énergétique direct du soleil, ce qui résout un problème à long terme. Les capteurs d'insolation laissés longtemps sans entretien posent un problème: les salissures qui s'accumulent sur les fenêtres des capteurs provoquent des modifications apparentes du seuil d'insolation.

- *Rayonnement* : En principe, la plupart des capteurs de rayonnement exploités dans les stations traditionnelles peuvent être reliés à un système automatique. Le principal problème technique est que ces capteurs sont en général des appareils analogiques qui produisent, comme signal de sortie, de très faibles tensions à variation continue. Ces tensions sont très sensibles aux interférences électromagnétiques dues aux câbles qui transmettent les signaux, interférences ce qui implique de prendre des précautions pour réaliser une mesure. L'accumulation de salissures sur la fenêtre des instruments est encore plus critique pour la mesure du rayonnement (qui est une mesure absolue) que pour celle de l'insolation. On considère que le dépôt de poussière sur le dôme des pyranomètres provoque une baisse d'exactitude de 2 % (à l'exclusion des jours de gel ou de rosée). C'est pourquoi il est difficile d'envisager l'emploi de tels appareils

à des endroits non visités pendant plusieurs jours. On peut obtenir une exactitude d'observation (en moyenne journalière) de l'ordre de 5 %.

- *Hauteur des nuages* : Actuellement, la mesure de la hauteur des nuages dans les stations météorologiques automatiques se fait essentiellement à l'aide de célosmètres (laser). On trouvera dans la publication OMM/TD-N° 217 une évaluation des systèmes actuellement employés. Il existe encore des difficultés à traiter les signaux transmis automatiquement par les capteurs afin de produire des mesures exactes de la hauteur de la base des nuages dans les conditions très diverses rencontrées dans la nature, notamment en cas de pluie ou de neige. Une autre difficulté est due au fait que les capteurs ne mesurent la hauteur des nuages que sur une zone très réduite située directement au-dessus d'eux. De telles informations, transmises à des utilisateurs à distance, risquent de donner une image dangereusement incorrecte de la couverture nuageuse, surtout si les données doivent être utilisées en aéronautique. Il est possible d'éliminer ce problème en faisant appel à des algorithmes pour évaluer la nébulosité pendant des intervalles de traitement de 30 minutes. Dans certains pays, le rôle du célosmètre se limite à une aide à l'observateur qui observe lui-même le ciel. Les célosmètres, qui consomment habituellement une grande quantité d'énergie, ne peuvent généralement être employés que dans des endroits normalement desservis en électricité. Par ailleurs, l'accumulation de neige, de poussière ou d'autres salissures sur les fenêtres par lesquelles s'effectuent l'entrée et la sortie du faisceau de lumière visible ou infrarouge peut nuire à leur bon fonctionnement.

- *Visibilité* : il existe une grande variété d'instruments qui permettent de mesurer la visibilité dans les stations météorologiques automatiques. À cet égard, on pourra se référer à la publication OMM/TD-N° 401.

Il est possible d'établir une distinction entre les transmissiomètres et les diffusomètres. Les transmissiomètres qui offrent une grande exactitude sont utilisés surtout sur les aérodromes alors que les diffusomètres mesurant la rétrodiffusion ou la diffusion avant et les diffusomètres intégrés, qui offrent une exactitude de mesure moindre, mais sont aussi moins coûteux, sont plus courants dans les autres stations automatiques. Les deux types d'appareils existent dans des versions pouvant être alimentées par des batteries, ce qui en autorise l'emploi à des endroits isolés non alimentés en courant alternatif, notamment par un réseau de distribution. Cependant, ils consomment beaucoup d'énergie et, à moins d'être alimentés par une source auxiliaire

de courant, ne peuvent normalement pas être utilisés plus de quelques semaines sans que les batteries soient renouvelées.

1.2.2 Unité centrale

Le cœur d'une station météorologique automatique est l'unité centrale. La configuration matérielle de cette unité centrale dépend de la complexité et de l'importance des fonctions à assurer et du fait que ces fonctions puissent être remplies par un seul et même matériel. En général, les principales fonctions de l'unité centrale sont l'acquisition, le traitement, le stockage et la transmission de données.

Dans la majorité des stations automatiques existantes, toutes ces fonctions sont exécutées par un système piloté par microprocesseur installé dans une enceinte à l'épreuve des intempéries, aussi près que possible des capteurs, ou à l'intérieur d'un bâtiment. Si l'unité centrale est placée à proximité des capteurs, le traitement sur place permet de réduire le nombre de données à transmettre et de présenter ces données sous une forme qui en permet la transmission directe par des voies de communication. Dans un tel cas, cependant, l'unité centrale est sensible aux pannes d'électricité et doit être protégée du milieu extérieur dans lequel elle fonctionne. Si l'unité centrale est placée à l'intérieur d'un bâtiment, il est généralement possible de la raccorder à une alimentation secteur et de la faire fonctionner comme si elle se trouvait dans un environnement normal de bureau. Cependant, une telle configuration exige l'emploi de longs câbles d'interconnexion et de conditionneurs de signaux.

Selon les conditions et les besoins locaux, les diverses fonctions de l'unité centrale peuvent être exécutées par des éléments distincts. Dans ce cas, ces éléments disposent chacun de leur propre microprocesseur et du logiciel approprié. Ils peuvent être installés à divers endroits dans la station et communiquent les uns avec les autres par l'intermédiaire de liaisons et de procédures bien établies de transfert de données entre processeurs. Ils fonctionnent de manière dépendantes, l'unité de traitement des données étant l'unité principale. On peut prendre comme exemple l'installation d'une ou de plusieurs unités d'acquisition de données à proximité de capteurs, reliées à l'élément de traitement ou de transmission de l'unité centrale par l'intermédiaire d'une ou de plusieurs lignes téléphoniques permettant la transmission numérique de données. Ces unités peuvent se composer d'un seul capteur (par exemple un capteur intelligent tel qu'un célosmètre laser), de plusieurs capteurs semblables (par exemple des thermomètres) ou de plusieurs capteurs différents.

L'évolution technique rapide des systèmes industriels modernes d'acquisition de données et de commande de processus ouvre de nouvelles possibilités pour les applications météorologiques. La modularité et la souplesse élevées des entrées-sorties, l'augmentation phénoménale de la vitesse des microprocesseurs et l'existence de logiciels spécialisés d'acquisition de données, de conduite de processus, de commande et de télécommunications permettent de créer des stations météorologiques automatiques susceptibles de répondre aux divers besoins en matière d'observation et aux exigences de divers utilisateurs. C'est pourquoi une quelconque description d'une station automatique risque d'être rapidement périmée et doit être considérée sous toutes réserves. Compte tenu de cette remarque, nous présentons ci-après un tableau général de l'état actuel des connaissances.

1.2.2.1 Acquisition de données

En général, le matériel d'acquisition de données se compose :

- D'un conditionneur de signal qui empêche les sources extérieures d'interférences indésirables d'influer sur les signaux non traités émanant des capteurs, protège les composants électroniques de l'unité centrale et adapte les signaux en vue d'un traitement ultérieur ;
- De systèmes électroniques d'acquisition de données équipés de canaux et de ports d'entrée analogiques et numériques ainsi que de modules de balayage et de conversion de données permettant d'introduire les signaux dans la mémoire de l'unité centrale.

Conditionnement du signal

Le conditionnement du signal, fonction essentielle du processus d'acquisition de données, commence par un choix de câbles et de connecteurs appropriés pour relier les capteurs au matériel électronique d'acquisition de données. Cette fonction est surtout réalisée aux niveau des modules matériels. Plusieurs fonctions de conditionnement ayant pour origine des commandes de processus industriels sont désormais intégrées dans un seul module amovible.

L'endroit le plus pratique et le plus courant pour installer ces modules est le panneau auquel aboutissent les câbles des capteurs, dans la même enceinte à l'épreuve des intempéries que le matériel d'acquisition de données. Selon les capteurs considérés et les conditions locales, on peut faire appel à diverses techniques de conditionnement du signal.

- Câbles de raccordement des capteurs* : Les signaux électriques émanant de capteurs, transmis à un système d'acquisition de données, peuvent subir des bruits indésirables. La gêne provoquée par ces bruits dépend du rapport signal/bruit et de l'application considérée. Les signaux numériques sont relative-

ment insensibles au bruit en raison de leur caractère discret (et de leur niveau élevé). En revanche, les signaux analogiques subissent l'influence directe de perturbations à relativement bas niveau. Les principaux mécanismes de transmission de signaux parasites sont le couplage capacitif et le couplage inductif. Pour réduire les erreurs dues au couplage capacitif, on peut employer des câbles blindés et placer un matériau conducteur (au potentiel de la terre) entre les câbles d'interconnexion et la source de parasites. On peut également faire appel à des paires torsadées pour réduire efficacement le couplage électromagnétique.

- *Protection contre les surtensions* : Si une station météorologique automatique risque de subir des surtensions accidentelles, il est indispensable d'installer un dispositif de protection pour éviter l'éventuelle destruction du matériel. Les surtensions peuvent être dues à des champs magnétiques, à l'électricité statique et surtout à la foudre.

- *Émetteurs à deux fils* : Il est parfois souhaitable de préamplifier les signaux de bas niveau à proximité des capteurs pour conserver un rapport signal/bruit maximal. Ce type de conditionnement peut s'obtenir au moyen d'un émetteur à deux fils. Les émetteurs de ce type ne font pas qu'amplifier le signal d'entrée, ils assurent également son isolation et le transforment en un courant fort (généralement compris entre 4 et 20 mA). La transmission de courant permet d'envoyer des signaux à une distance d'environ 1 500 m.

- *Isolation numérique* : Des modules électriques servent à acquérir des signaux numériques d'entrée tout en éliminant le rapport galvanique établi entre la source de signaux et le matériel de mesure. Ces modules ne font pas qu'isoler, ils transforment aussi les signaux d'entrée en niveaux de tension normalisés pouvant être lus par le matériel d'acquisition de données.

- *Isolation analogique* : Des modules d'isolation analogique servent à protéger le matériel des hautes tensions, à couper les boucles de terre et à supprimer les signaux importants de mode commun. Trois types d'isolation analogique sont couramment employés de nos jours: le couplage capacitif ou condensateur d'isolation, d'un faible prix, le couplage optique, qui donne de bons résultats pour un prix raisonnable, et la liaison par transformateur, précise et donnant une isolation élevée, mais plus chère.

- *Filtrage par filtre passe-bas* : on se sert de filtres pour séparer les signaux voulus des signaux indésirables. Les signaux indésirables sont le bruit, la captation de fréquences parasites émises par une ligne de cou-

rant alternatif, les interférences dues aux émetteurs de radio et de télévision et les signaux ayant une fréquence supérieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. On emploie en général un filtre passe-bas pour éliminer ces sources d'erreurs indésirables, en excluant la partie du spectre où des signaux recherchés n'existent pas.

- *Amplificateurs* : L'amplitude des signaux analogiques émanant de capteurs peut varier considérablement. Par ailleurs, il faut un signal de haut niveau pour que le fonctionnement d'un numériseur soit optimal. Dans de nombreux cas, on se sert d'un amplificateur pour donner l'amplitude voulue aux éventuels signaux de bas niveau. On emploie également des amplificateurs pour uniformiser la sortie en tension de l'ensemble des capteurs et obtenir une tension commune, entre 0 et 5 V en courant continu par exemple.

- *Résistances* : Des modules spéciaux sont utilisés pour transformer une résistance telle que celle des thermomètres au platine en tension de sortie linéarisée et pour produire le courant de sortie nécessaire à cette transformation. Il est à noter que le passage à un signal linéaire peut être une source d'inexactitude, critique pour certaines applications.

Fonction d'acquisition de données

La fonction d'acquisition de données consiste à explorer les signaux de sortie de capteurs ou de modules de conditionnement à une vitesse prédéterminée et à traduire ces signaux sous une forme assimilable par un ordinateur.

Pour que les différents types de capteurs météorologiques puissent être desservis, le matériel servant à cette fonction se compose de divers canaux d'entrée-sortie qui correspondent à l'ensemble des caractéristiques des signaux électriques de sortie des capteurs et des modules de conditionnement. Le nombre total de canaux de chaque type, qui dépend des caractéristiques de sortie des capteurs, est déterminé par le type d'application considéré.

- *Entrées analogiques* : Le nombre de canaux analogiques se situe en général entre 4 et 32. Habituellement, on peut élargir une configuration de base à l'aide de modules additionnels. Les canaux d'entrée analogiques sont particulièrement importants du fait que la plupart des capteurs météorologiques d'usage courant tels que les capteurs de température, de pression et d'humidité émettent un signal sous forme de tension directement ou indirectement par l'intermédiaire d'un module de conditionnement.

Les tâches d'acquisition de données sont l'exploration des canaux et la numérisation des signaux qui

en émanant. Un commutateur cyclique est un simple commutateur qui permet à un seul convertisseur de desservir plusieurs canaux d'entrée analogiques. Ces commutateurs peuvent être commandés par un logiciel qui choisit un canal donné dont les signaux sont à traiter à un moment défini. Le convertisseur transforme les données analogiques d'origine en données assimilables par l'ordinateur (numériques, en codes binaires). La résolution analogique-numérique s'exprime en bits. Une résolution de 12 bits correspond environ à 0,025 % de la gamme ou échelle complète analogique-numérique, une résolution de 14 bits à 0,006 % et une résolution de 16 bits à 0,0015 %.

- *Ports numériques de type parallèle* : L'ensemble des canaux est groupé essentiellement en blocs de huit ou 16 bits, avec possibilités d'extension. Ces blocs servent à l'analyse de bits individuels ou d'état, ou alors à la saisie des signaux de capteurs émettant des signaux numériques en parallèle (par exemple des girouettes émettant en code Gray).
- *Impulsions et fréquences* : Le nombre de canaux est généralement limité entre deux et quatre. Des appareils caractéristiques de ce type sont les capteurs de vitesse du vent et les pluviomètres (à augets basculants). On fait appel à des compteurs basse et haute vitesse qui cumulent les impulsions dans des mémoires spécialisées de l'unité centrale. Un système qui enregistre les impulsions ou l'état sous tension-hors tension d'un transducteur s'appelle un enregistreur d'événement.
- *Ports numériques de type série* : Il s'agit de canaux individuels d'entrée-sortie série asynchrone permettant l'échange de données avec des capteurs intelligents. Ces canaux permettent des transmissions traditionnelles entre appareils à courte distance (RS232: plusieurs mètres) ou à longue distance (RS422/485: plusieurs kilomètres). Divers capteurs ou systèmes de mesure peuvent partager une même ligne et un même port d'entrée, l'accès à chacun des capteurs se faisant séquentiellement au moyen de mots codés.

1.2.2.2 Traitement de données

Le matériel de traitement de données est le cœur de l'unité centrale. Ses principales fonctions sont la commande centralisée des entrées-sorties en provenance ou en direction de l'unité centrale et le traitement de l'ensemble des données en entrée au moyen du logiciel approprié.

Son fonctionnement est piloté par microprocesseur. Les microprocesseurs ne modifient en rien les principes des mesures météorologiques et les pratiques en matière d'observation, mais ils permettent aux constructeurs de concevoir autrement des fonctions

techniques qui rendent les mesures plus faciles, plus rapides et plus fiables et d'accroître les possibilités des instruments, surtout en ce qui concerne le traitement des données. L'adoption de microprocesseurs réduit considérablement le coût du matériel associé à certaines applications. Il est à noter, cependant, que les possibilités qu'ouvrent les microprocesseurs conduisent très souvent à une augmentation rapide et fortement sous-évaluée du coût de mise au point des logiciels.

La plupart des systèmes automatiques d'observation météorologique existants sont équipés de microprocesseurs huit bits et possèdent une mémoire limitée (32 à 64 ko). De nouveaux systèmes dotés de microprocesseurs 16 ou même 32 bits auxquels est associée une importante mémoire intégrée (allant jusqu'à 1 Mo) s'imposent à présent. Ces systèmes automatiques d'observation météorologique acceptent davantage d'entrées-sorties, fonctionnent beaucoup plus vite pour traiter les données et peuvent exécuter des calculs complexes. Ce nouveau type de matériel s'accompagne de logiciels perfectionnés qui, jusqu'à il y a quelques années, étaient réservés aux mini-ordinateurs. Le matériel peut être équipé de divers types de mémoires: mémoire vive (RAM: Random Access Memory) pour le stockage des données et des programmes, mémoire morte programmable (PROM : Programmable Read-Only Memory) pour le stockage des programmes (introduits en mémoire au moyen d'un programmeur de PROM), mémoire morte programmable effaçable électriquement (EEPROM : Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), qui sert essentiellement à la mémorisation de constantes et qui peut être modifiée directement par des logiciels. Dans la plupart des stations, la mémoire vive peut-être alimentée par une pile de secours, ce qui permet d'éviter la perte de données à la suite d'une panne de courant. Dans les stations qui travaillent en différé et qui ne possèdent pas de matériel de transmission de données, on peut stocker les données dans une mémoire externe. Des appareils mécaniques à bandes utilisés pour cela depuis de nombreuses années sont maintenant remplacés par des cartes mémoire (mémoires vives avec alimentation de secours, EEPROM, etc.), nettement plus fiables.

1.2.2.3 Transmission de données

La composante de l'unité centrale assurant la transmission de données établit un lien avec le monde extérieur, notamment: les observateurs locaux, le personnel de maintenance, le système central de gestion de réseau du Service météorologique et hydrologique national ou même directement les utilisateurs de l'information météorologique. Le matériel est relié à l'unité centrale par les ports d'entrée-sortie série ou parallèle. Le meilleur moyen de transmettre les

données dépend principalement du site considéré et du matériel de transmission disponible. Aucune solution ne peut être considérée comme supérieure en soi; la chaîne de transmission exige parfois l'emploi de plusieurs dispositifs (voir section 1.3.2.10).

1.2.3 Périphériques

- Alimentation électrique* : La conception d'une station météorologique automatique et ses capacités dépendent en grande partie de la technique employée pour son alimentation électrique. Les caractéristiques les plus importantes de l'alimentation d'une station automatique sont une grande stabilité et l'absence de parasites. Pour des motifs de sécurité et en raison du caractère répandu des batteries de 12 volts pour véhicules automobiles, il est bon d'envisager l'emploi d'une alimentation 12 V en courant continu. Si l'on dispose d'un raccordement au secteur, on peut brancher les batteries sur le secteur pour la charge d'entretien. Un tel système a l'avantage d'assurer une alimentation de secours automatique en cas de panne de courant. Les stations météorologiques automatiques installées à des endroits isolés non desservis en courant secteur sont alimentées par des batteries qu'il est possible ou non de charger par des sources d'alimentation auxiliaires: groupe diesel, éolienne, générateur暮 par l'eau ou photopiles solaires. Cependant, les systèmes de ce type, qui produisent peu d'énergie, ne peuvent en général pas alimenter les capteurs complexes nécessaires à la mesure de la hauteur des nuages et de la visibilité, forts consommateurs d'énergie. En outre, les stations automatiques équipées de matériel auxiliaire tel que des dispositifs de chauffage (anémomètres, pluviomètres) et des aspirateurs risquent également de consommer une énergie considérable, ce qui limite l'installation à des endroits desservis en courant secteur. Si, en raison de la nécessité d'un système polyvalent et complet, il n'y a que le secteur qui puisse assurer une alimentation suffisante, il faut quand même prévoir une alimentation de secours, au moins pour l'horloge système, le processeur et la mémoire non rémanente, qui peut contenir des données récentes nécessaires au redémarrage automatique de la station.

- Horloge temps réel* : Une horloge temps réel programmée sur 24 heures, alimentée par pile, afin que l'heure soit maintenue même en cas de panne de courant, est un élément essentiel du matériel assurant le traitement de données. L'exactitude des horloges employées dans les stations automatiques nécessite une attention particulière si l'on veut que les affichages, les intervalles d'échantillonnage et les indications horaires demeurent corrects. Dans certaines stations, on fait appel à un dispositif qui

synchronise l'horloge par rapport à des signaux de référence diffusés par radio ou par rapport au système de positionnement global (GPS).

- *Contrôleur intégré* : Les éléments essentiels d'une station météorologique automatique comportent souvent des composants dont le mauvais fonctionnement ou la défaillance peuvent réduire sérieusement la qualité des données de sortie principales ou leur enlever toute utilité. L'inclusion de circuits qui contrôlent automatiquement l'état de ces composants est un moyen efficace de vérifier constamment leurs performances en cours de fonctionnement. En voici quelques exemples: un détecteur de panne d'alimentation qui relance le processeur et évite l'interruption des fonctions de la station à la suite d'une panne de courant, un contrôleur de séquence qui vérifie si les microprocesseurs fonctionnent correctement, des circuits de test qui contrôlent l'état de fonctionnement de sous-systèmes de la station — batteries, chargeur, aspirateurs (enceintes des capteurs de température et d'humidité), numériseur, appareils de chauffage, etc. Les données sur l'état de ces éléments peuvent s'afficher automatiquement sur le site ou être introduites dans l'unité centrale en vue du contrôle de la qualité et de la maintenance.
- *Écrans d'affichage et terminaux locaux* : Les contraintes d'exploitation exigent souvent que certaines observations soient introduites ou corrigées manuellement, comme c'est le cas dans les stations semi-automatiques. Selon les caractéristiques requises et la conception de la station, divers types de terminaux locaux sont employés dans ce but: un simple afficheur numérique à diodes électroluminescentes avec clavier, faisant partie intégrante de l'unité centrale, un écran avec clavier ou même un petit ordinateur personnel installé à un endroit éloigné, mais à l'intérieur d'un bâtiment. Pour la maintenance, on se sert parfois de terminaux portatifs spéciaux, enfichables directement dans la station. Pour des applications particulières telles que celles des stations automatiques d'aéroport ou des stations fournissant une aide aux observateurs, des écrans d'affichage numériques permettent de visualiser les données à un ou plusieurs endroits sur le site. On peut aussi ajouter dans la station une imprimante ou des enregistreurs graphiques.

1.3

LOGICIEL D'UNE STATION MÉTÉOROLOGIQUE AUTOMATIQUE

Lorsqu'on conçoit une station météorologique automatique ou qu'on en définit les spécifications, il faut savoir que le coût de mise au point et d'essai des logiciels sera l'un des postes financiers les plus lourds

de l'ensemble. À moins d'en soigner particulièrement la conception préliminaire et de respecter une discipline rigoureuse lors du codage, un ensemble complexe de logiciels perd rapidement de sa souplesse et devient difficile à gérer. Des modifications mineures des caractéristiques requises, telles que celles qu'exige souvent l'installation d'un nouveau capteur, la modification d'un code ou la modification de critères de contrôle de la qualité, entraînent fréquemment des transformations approfondies et très coûteuses des logiciels.

En général, on peut établir une distinction entre le logiciel d'application, qui consiste en des algorithmes permettant le traitement correct des données selon les caractéristiques requises par l'utilisateur, et le logiciel de base, inhérent à la configuration du microprocesseur et qui permet de mettre au point et de faire tourner les programmes d'application.

On trouvera des conseils sur la mise au point d'algorithmes pour les stations automatiques dans la section 1.1.3 ci-dessus. La conception d'algorithmes destinés aux stations météorologiques automatiques synoptiques a été décrite dans la publication OMM/TD-N° 230. Les algorithmes de traitement des données sur le vent de surface font l'objet de la publication OMM/TD-N° 452, tandis que la publication OMM/TD-N° 1160 est consacrée aux algorithmes que les Membres de l'OMM utilisent. Des renseignements détaillés sur l'échantillonnage, la réduction des données et le contrôle de la qualité figurent en outre dans les chapitres appropriés de la Partie III du présent Guide.

1.3.1 Logiciel de base

Le logiciel de base de nombreuses stations automatiques existantes, élaboré par le constructeur conformément aux exigences des utilisateurs — appelé micrologiciel —, est introduit dans la mémoire de l'unité centrale sous une forme non lisible par les utilisateurs, ce qui fait de l'unité centrale une sorte de boîte noire. Les utilisateurs, qui ne peuvent exécuter que des commandes prédéterminées, dépendent entièrement du constructeur en cas d'anomalie ou de modification du logiciel de base.

Fort heureusement, la demande accrue de systèmes d'acquisition de données pour la commande de processus industriels a ouvert de nouvelles possibilités. Les utilisateurs peuvent désormais mettre au point leur propre logiciel d'application (ou en laisser le soin à une société de services et d'ingénierie en informatique ou même au constructeur de la station) au moyen de langages évolués tels que Basic, Pascal ou, en particulier, le langage C et en faisant appel à des programmes utilitaires d'emploi courant

pour l'acquisition de données, les statistiques, la mémorisation et les transmissions. Grâce à cela, les utilisateurs comprennent mieux et maîtrisent davantage les divers processus et dépendent moins du constructeur de la station.

Dans les systèmes récents, on fait de plus en plus appel à des systèmes d'exploitation multitâches et multi-utilisateurs travaillant en temps réel et ayant fait leurs preuves, qu'on ne trouvait auparavant que sur des mini-ordinateurs. Ces systèmes d'exploitation travaillent en temps réel, car toutes les opérations sont commandées par des interruptions matérielles ou logicielles. Ils sont multitâches, car plusieurs tâches peuvent être exécutées presque simultanément selon une priorité prédéterminée. Ils sont multi-utilisateurs, car divers utilisateurs peuvent avoir accès au système presque simultanément. Le réalisateur de logiciels peut consacrer toute son attention à la mise au point de programmes d'application dans le langage de son choix, laissant au système d'exploitation le soin de s'occuper des fonctions très difficiles et complexes de commande et d'exécution des tâches.

1.3.2 Logiciel d'application

Les fonctions de traitement que doivent exécuter soit l'unité centrale, soit les interfaces des capteurs, soit une combinaison des deux dépendent dans une certaine mesure du type de station météorologique automatique considéré et de son but. En général, une partie ou l'intégralité des opérations suivantes sont nécessaires: l'initialisation, l'échantillonnage des signaux de sortie des capteurs, la transformation de ces signaux en données météorologiques, la linéarisation, l'établissement de moyennes, la saisie manuelle d'observations, le contrôle de la qualité, la réduction des données, la composition et le contrôle des messages, la mémorisation, la transmission et l'affichage des données. L'ordre dans lequel ces fonctions sont disposées n'est qu'approximativement séquentiel. Le contrôle de la qualité peut être effectué à diverses étapes: dès après l'échantillonnage, à la suite du calcul des variables météorologiques ou après la saisie manuelle des données et la composition des messages. Faute de vérification de la qualité des données et du contenu des messages, les données fournies par les stations automatiques risquent fort de contenir des erreurs non détectées. Si la linéarisation peut être effectuée par le capteur ou le module de conditionnement du signal, elle doit toujours avoir lieu avant le calcul d'une valeur moyenne.

L'exécution du logiciel d'application est gérée par un ordonnanceur qui commande les tâches à exécuter et le moment de leur exécution. L'aperçu que nous

donnons ci-après du logiciel d'application d'une station météorologique automatique se limite à certains aspects pratiques propres à ce type de station.

1.3.2.1 Initialisation

L'initialisation est le processus qui prépare l'ensemble des mémoires, établit tous les paramètres d'exploitation et lance le logiciel d'application. Pour pouvoir démarrer une opération normale, le logiciel doit d'abord prendre connaissance de certains paramètres spécifiques, notamment: les paramètres propres à la station (numéro de code, altitude, latitude et longitude), la date et l'heure, l'emplacement physique du capteur dans la section d'acquisition de données, le type et les caractéristiques des modules de conditionnement des signaux, les constantes de conversion et de linéarisation pour la traduction des signaux émanant du capteur en valeurs météorologiques, les valeurs limites absolues et les valeurs limites du taux de variation en vue du contrôle de la qualité ou encore l'implantation du fichier de mise en mémoire tampon. Selon la station, l'ensemble ou une partie de ces paramètres peuvent être introduits ou modifiés localement par les utilisateurs grâce à des menus interactifs s'affichant sur un terminal. Dans la dernière génération de stations automatiques, l'initialisation peut même être effectuée à distance, par exemple par un système central de gestion de réseau ou par un ordinateur personnel éloigné. En plus d'une initialisation complète, il faudrait programmer une initialisation partielle qui puisse rétablir automatiquement un fonctionnement normal, sans perte des données mémorisées, après une interruption temporaire due au réglage de l'horloge temps réel, à une opération de maintenance ou d'étalonnage ou à une panne de courant.

1.3.2.2 Échantillonnage et filtrage

L'échantillonnage se définit comme le processus consistant à obtenir une suite bien espacée de mesures d'une variable. Lors du traitement numérique des signaux émanant d'un capteur météorologique, la question se pose de savoir avec quelle fréquence il faut échantillonner ces signaux. L'important est de veiller à ce que la séquence d'échantillons représente correctement les variations sensibles de la variable atmosphérique à mesurer. Une règle empirique généralement acceptée consiste à procéder à au moins un échantillonnage par intervalle de temps égal à la constante de temps du capteur. Cependant, vu la fréquence élevée associée à certaines variables météorologiques, il faudrait d'abord procéder à un filtrage ou à un lissage correct en choisissant des capteurs possédant une constante de temps adéquate ou par des techniques de filtrage et de lissage appliquées par les modules de conditionnement des signaux (voir chapitre 2, Partie III).

Compte tenu de l'interchangeabilité nécessaire des capteurs et de la nécessité d'assurer l'homogénéité des données découlant des observations, il est recommandé¹²:

- a) Que les échantillonnages pratiqués pour calculer les moyennes soient réalisés à intervalles réguliers qui :
 - 1 - Ne devront pas être supérieurs à la constante de temps du capteur,
ou
 - 2 - Ne devront pas être supérieurs à la constante de temps d'un filtre analogique passe-bas placé à la sortie du capteur à réponse linéaire rapide,
ou
 - 3 - Devront être suffisamment nombreux pour que l'incertitude relative à la moyenne des échantillons soit ramenée à un niveau acceptable, par exemple qu'elle soit inférieure à celle qui correspond à l'exactitude requise pour la moyenne de la variable ;
- b) Que les échantillons qui serviront à estimer les extrêmes soient prélevés à intervalles au moins quatre fois plus fréquents que ceux prévus aux alinéas 1 ou 2 ci-dessus.

1.3.2.3 Conversion de données brutes

La conversion de données brutes consiste à transformer les signaux électriques produits par les capteurs ou les modules de conditionnement des signaux en valeurs météorologiques. Ce processus exige l'application d'algorithmes de conversion qui font appel à des constantes et à des fonctions de transfert définies au cours des procédures d'étalonnage.

Il est important de comprendre que certains capteurs sont fondamentalement non linéaires, autrement dit que leurs signaux de sortie ne sont pas directement proportionnels aux variables atmosphériques mesurées (comme dans le cas d'un thermomètre à résistance), que certaines mesures subissent l'influence de variables extérieures suivant une relation non linéaire (les résultats produits par certains capteurs de pression et d'humidité étant par exemple influencés par la température) et que, même si le capteur est linéaire en soi ou comporte des circuits de linéarisation, il n'y a pas de relation linéaire entre les variables mesurées et la variable atmosphérique considérée (par exemple, le signal de sortie d'un célosmètre à faisceau tournant équipé d'un photodétecteur et d'un codeur d'angle de rotation qui indique l'intensité de la lumière rétrodiffusée en fonction de l'angle donne la hauteur des nuages de façon non linéaire). Il est ainsi nécessaire d'introduire des corrections pour

¹² Recommandation 3 (CIMO-X) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa dixième session (1989).

tenir compte de la non-linéarité des algorithmes de conversion dans la mesure où les modules de conditionnement des signaux ne le font pas. La linéarisation est particulièrement importante lorsqu'il faut calculer des valeurs moyennes sur une certaine période. En effet, lorsque le signal émanant d'un capteur n'est pas constant durant la période d'établissement de la moyenne, la séquence d'opérations « établissement d'une moyenne suivi d'une linéarisation » peut donner des résultats différents de la séquence « linéarisation suivie de l'établissement d'une moyenne ». La bonne procédure à suivre est d'établir uniquement la moyenne de variables linéaires.

1.3.2.4 Valeurs météorologiques instantanées

En raison de la variabilité naturelle à petite échelle de l'atmosphère, de l'introduction de bruits dans le processus de mesure par des appareils électroniques et en particulier de l'emploi de capteurs ayant des constantes de temps courtes, il est éminemment souhaitable d'établir des moyennes pour réduire l'incertitude des données recueillies.

Afin de normaliser les algorithmes de calcul de moyennes, il est recommandé¹³ :

- a) Que les données sur la pression atmosphérique, la température de l'air, l'humidité de l'air, la température de la surface de la mer et soient transmises sous forme de moyennes sur une à dix minutes, obtenues après linéarisation du signal de sortie des capteurs ;
- b) Que les données sur le vent, sauf celles sur les rafales, soient transmises sous forme de moyennes sur deux ou dix minutes, obtenues après linéarisation du signal de sortie des capteurs.

Les moyennes ainsi obtenues, qui doivent être considérées comme les valeurs « instantanées » des variables météorologiques à employer dans la plupart des applications opérationnelles, ne doivent pas être confondues avec les échantillons bruts instantanés émanant des capteurs ni avec les valeurs moyennes sur de plus grandes périodes qu'exigent certaines applications. Dans la mesure où cela est applicable, des moyennes sur une minute sont proposées comme valeurs instantanées correctes pour la plupart des variables. Il existe des exceptions : la mesure du vent (voir (b) ci-dessus) et celle des vagues (moyenne sur 10 ou 20 minutes). Compte tenu des écarts que peuvent présenter les observations des rafales maximales obtenues à partir de systèmes de mesure du vent ayant des temps de réponse différents, il est recommandé

¹³ Recommandation 6 (CIMO-IX) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa neuvième session (1985).

que les caractéristiques de filtrage d'une chaîne de mesure du vent soient telles que les rafales maximales indiquées correspondent à une moyenne sur trois secondes. C'est la moyenne la plus élevée sur trois secondes qu'il convient de transmettre. Dans la pratique, cela exige que les signaux de sortie du capteur soient échantillonnés et que la moyenne mobile sur trois secondes soit calculée au moins une à quatre fois par seconde.

Certaines grandeurs en particulier, qui nécessitent une conversion pour le calcul des moyennes, sont indiquées dans le chapitre 2 de la Partie III.

1.3.2.5 Saisie manuelle d'observations

Pour certaines applications, il est nécessaire de mettre au point des programmes interactifs qui, à partir de terminaux, permettent aux observateurs d'introduire et de corriger des observations visuelles ou subjectives pour lesquelles il n'existe pas de capteurs automatiques dans la station. Ces observations sont essentiellement celles du temps présent et passé, et de l'état du sol, ainsi que d'autres phénomènes particuliers.

1.3.2.6 Réduction de données

Outre les données météorologiques instantanées, obtenues directement à partir des données échantillonées à la suite d'une conversion appropriée, d'autres variables météorologiques opérationnelles et données statistiques sont à calculer. La plupart sont fondées sur des valeurs instantanées mémorisées alors que pour d'autres, les données sont obtenues avec une fréquence plus élevée d'échantillonnage, par exemple pour le calcul des rafales. Comme exemples de réduction de données, citons le calcul du point de rosée à partir des valeurs de l'humidité relative et de la température ou encore la réduction de la pression au niveau moyen de la mer. Les données statistiques comprennent les extrêmes sur une ou plusieurs périodes (par exemple pour la température), les cumuls (par exemple pour les précipitations) sur des périodes définies (allant de quelques minutes à plusieurs jours), les moyennes sur des périodes différentes (données climatologiques) et les valeurs intégrées (rayonnement). Ces variables et grandeurs peuvent être calculées au niveau de la station automatique ou alors par le système central de gestion de réseau qui offre normalement une puissance de calcul supérieure.

La CIMO participe à un vaste programme d'enquêtes qui vise à la normalisation des algorithmes pour toutes les variables et dont les résultats sont publiés dans les rapports de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation (OMM/TD-N° 1160).

Il existe des recommandations officielles en ce qui concerne la tendance barométrique¹⁴ et l'humidité¹⁵ (voir annexe 4.B, chapitre 4, Partie I).

Comme suite à l'enquête qu'elle avait lancée en 1952 (OMM-N° 36) sur les méthodes de réduction de la pression employées par ses Membres, l'OMM a conclu que la « formule internationale » (fondée sur la formule de Laplace ou les tables d'Angot) ainsi que des méthodes « simplifiées » étaient en usage (voir l'exemple des stations situées à faible altitude,¹⁶ au chapitre 3 de la Partie I du présent Guide). Cette enquête a conduit à une étude de la normalisation des méthodes de réduction qui a donné pour résultat, une équation générale de réduction de la pression recommandée en tant que norme¹⁷ (OMM-N° 154). On a pu observer par la suite que, outre la méthode recommandée, la « formule internationale » et des méthodes faisant appel à des formules simplifiées continuaient d'être utilisées dans la pratique (OMM-N° 226).

1.3.2.7 Codage des messages

Les spécifications fonctionnelles font souvent état de la nécessité de coder les messages météorologiques conformément au Manuel des codes (OMM-N° 306). Selon le type de message et les éléments à coder, la production de messages peut se faire de façon entièrement automatique ou semi-automatique. La production entièrement automatique suppose que tous les éléments à coder sont des données mesurables alors que la production semi-automatique exige l'intervention d'un observateur chargé de noter des observations visuelles ou objectives telles que le temps présent et passé, l'état du sol et le type de nuages. Il ne faut pas sous-estimer l'importance des algorithmes de codage de messages, dont la mise au point exige des efforts considérables, tout comme leur mise à jour, lorsque la structure des messages est modifiée par des règlements internationaux, régionaux et nationaux. Ces algorithmes occupent une quantité considérable de mémoire, qui peut être critique pour des stations aux performances limitées. Il est à noter que

les données d'observation peuvent être transmises à un système central de gestion de réseau qui, normalement, offre davantage de puissance informatique pour le codage des messages.

1.3.2.8 Contrôle de la qualité

Dans une station météorologique automatique, le contrôle de la qualité, réalisé à l'aide d'un matériel et de programmes appropriés, a pour objet de minimiser automatiquement le nombre d'observations inexactes et d'observations manquantes. On atteint ces deux objectifs en veillant à ce que chaque observation soit calculée à partir d'un nombre suffisamment élevé d'échantillons de données dont la qualité est contrôlée. On peut ainsi isoler et exclure les échantillons comportant d'importantes erreurs parasites, ce qui permet de poursuivre les calculs sans qu'ils soient faussés par ces échantillons.

Le contrôle de la qualité vise à garantir la qualité et l'uniformité des données fournies par les stations automatiques. Il consiste en un ensemble de procédures définies avec soin portant essentiellement sur les pratiques de maintenance, les réparations, l'étalonnage et les vérifications de la qualité des données. Il n'existe actuellement aucune norme en la matière s'appliquant aux divers types de stations météorologiques automatiques, ce à quoi il conviendrait de remédier en mettant au point un ensemble de procédures normalisées avec une documentation appropriée.

Dans les stations automatiques modernes, les résultats des procédures de contrôle de la qualité des capteurs indiquant pourquoi une mesure est suspecte ou erronée et les résultats des autocontrôles matériels effectués par un contrôleur intégré sont stockés dans des mémoires tampons de service. L'affichage visuel de tels indicateurs d'état est très pratique pour les opérations de maintenance sur site. La transmission à partir d'un réseau de stations automatiques vers un système central de gestion de réseau du contenu de ces mémoires, soit en annexe aux messages d'observation réguliers, soit sous forme de messages de service transmis à des fréquences établies ou sur demande, constitue une approche intéressante de la maintenance du matériel météorologique.

L'emploi de procédures en temps réel pour le contrôle de la qualité des données émanant de stations automatiques est fortement conseillé. Le chapitre 1 de la Partie III présente les recommandations détaillées à ce sujet, tandis que la publication OMM-N° 305 fait état des procédures normales de contrôle de la qualité. On trouvera ci-après une description pratique des recommandations pertinentes.

¹⁴ Recommandation 7 (CIMO-IX) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa neuvième session (1985).

¹⁵ Recommandation 7 (CIMO-X) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa dixième session (1989).

¹⁶ Recommandation 13 (CIMO-I) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa première session (1953).

¹⁷ Recommandation formulée par le Comité de travail II sur la réduction de la pression créée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa première session et adoptée par le Conseil exécutif lors de sa quatrième session (voir publication OMM-N° 36, Partie 2).

Contrôle distinct

Il s'agit ici de contrôler chaque échantillon d'un capteur le plus tôt possible en cours de traitement en tenant compte des fonctions de réponse du capteur et du module de conditionnement du signal, afin d'obtenir une valeur plausible et une variation également plausible.

- **Valeur plausible** : Il s'agit de vérifier en gros si la valeur mesurée respecte les limites absolues de variabilité. Ces limites dépendent de la nature de la variable ou du phénomène météorologique considéré, mais aussi de la plage de mesure du capteur et du matériel d'acquisition de données. Il est possible de procéder à des contrôles supplémentaires par rapport à des limites qui sont fonction de la région géographique, de la saison et du moment de l'année. Des valeurs limites s'appliquant à ces contrôles supplémentaires sont proposées dans les tableaux 6.3 à 6.9 du chapitre 6 de la publication OMM-N° 305. Les contrôles permettent d'établir un classement des valeurs obtenues: correctes, erronées ou suspectes.

- **Variation plausible** : Il s'agit de vérifier si la variation par rapport à un niveau précédent acceptable est plausible. L'efficacité de ce contrôle dépend de la cohérence dans le temps ou de la persistance des données. C'est aux données ayant une haute résolution temporelle (fréquence d'échantillonnage élevée) que les contrôles de ce type s'appliquent le mieux, car dans ce cas, la corrélation entre échantillons adjacents augmente avec la fréquence d'échantillonnage. Il est clair qu'il est difficile de déterminer à quel rythme une variable atmosphérique peut évoluer, compte tenu des caractéristiques de réponse du capteur considéré. Il est possible d'effectuer d'autres contrôles de cohérence temporelle en comparant les données transmises dans deux messages consécutifs. On trouvera dans la publication OMM-N° 305 les tolérances concernant la variation de la température de l'air, du point de rosée et de la tendance barométrique, selon les intervalles de temps séparant les mesures à des fins synoptiques (1, 2, 3, 6 et 12 heures).

Contrôle commun

Il est possible de procéder au contrôle de cohérence interne d'une variable par rapport à d'autres en se fondant sur des principes physiques et météorologiques établis. En voici quelques exemples: le point de rosée ne peut pas être supérieur à la température ambiante; des précipitations en l'absence de nuages au-dessus du point considéré ou après que des nuages viennent de passer sont fort improbables; une vitesse du vent non nulle avec une variance de la direction du vent égale à zéro indique une possibilité d'anomalie du capteur de direction du vent, tandis qu'une vitesse moyenne du vent nulle avec une

variance de la direction du vent différente de zéro indique une possibilité d'anomalie d'un capteur de vitesse du vent.

Observation saisie manuellement

Lorsqu'une grandeur relevée par un observateur est saisie dans une station automatique, les contrôles distincts et communs, indiqués ci-dessus, peuvent être effectués. Certains contrôles spéciaux de cohérence sont proposés dans la publication OMM-N° 305 à propos des éléments suivants : temps présent par rapport à la visibilité ; temps présent par rapport à la nébulosité ; nébulosité par rapport aux données sur le temps et les nuages ; temps présent par rapport à la température de l'air ; temps présent par rapport au point de rosée ; hauteur des nuages par rapport au type de nuages ; état de la mer par rapport à la vitesse du vent.

Contrôle du matériel

Le vieillissement du matériel, l'apparition de situations dans lesquelles le matériel n'a pas été testé, un manque d'entretien, les pannes, etc. tendent à nuire au bon fonctionnement d'une station météorologique automatique. Il importe donc qu'une station automatique dispose d'un appareillage intégré destiné à contrôler en automatique et de façon périodique ses éléments matériels, les résultats ainsi obtenus étant soit mis à la disposition du personnel compétent, soit mémorisés dans des mémoires tampons de service. Les mémoires en question peuvent être consultées et les données d'état peuvent être employées pour établir un classement des mesures: correctes, erronées ou suspectes.

Contrôle des messages

Dans le cas de stations météorologiques automatiques équipées d'un logiciel de codage des messages et de transmission de ceux-ci par le Système mondial de télécommunications, il est essentiel que tous les contrôles indiqués ci-dessus soient effectués très soigneusement. Il faudrait également vérifier si les règlements concernant les caractères, le nombre et la structure des messages, etc. sont respectés. Des dispositions appropriées sont à envisager si certaines valeurs sont classées comme suspectes.

1.3.2.9 Stockage des données

Les données traitées et celles relevées par des observateurs, y compris les données d'état émanant du contrôle de la qualité (données de service) doivent être mises en mémoire tampon ou mémorisées pendant un certain temps à la station. Il faut pour cela qu'une base de données appropriée soit mise à jour en temps réel. Le nombre de champs dans la base de données et la mémoire nécessaires sont à déterminer en fonction du nombre maximal possible de capteurs, de données intermédiaires et de grandeurs

calculées, ainsi que de l'autonomie requise pour la station. On adopte en général une mise en mémoire de type circulaire qui permet d'écraser les anciennes données en les remplaçant par de nouvelles après une période déterminée. La structure de la base de données devrait permettre un accès simple et sélectif par un transfert de données et des algorithmes de transmission.

Selon les besoins en matière d'observations et le type de station, les données peuvent être transmises à intervalles réguliers de la mémoire principale de la station à d'autres types d'unités de stockage, notamment amovibles.

1.3.2.10 Transmission de données

En fonction des impératifs de l'exploitation, l'émetteur d'une station météorologique automatique peut opérer suivant divers modes pour transmettre les données aux utilisateurs locaux ou au système central de gestion de réseau :

- a) Transmission en réponse à des ordres extérieurs, ce qui est le mode le plus élémentaire: on possède ainsi une meilleure maîtrise sur la station, notamment pour l'initialisation, le réglage et la remise à l'heure de l'horloge temps réel, l'invalidation des capteurs défectueux, le transfert sélectif de bases de données, etc. À la réception et après contrôle de transmission d'un ordre extérieur, un ordonnanceur de tâches lance la tâche ou le sous-programme voulu correspondant à l'ordre ;
- b) Transmission à intervalles périodiques générés par l'ordonnanceur de la station ;
- c) Transmission d'urgence déclenchée par la station lorsque certains seuils météorologiques sont dépassés.

En général, on peut se servir de progiciels de transmission de données, d'usage courant, qui se chargent du transfert et du contrôle des données ainsi que des protocoles de transmission. Comme les dispositifs de transmission de données peuvent subir divers types d'interférences, il faut veiller à ce que les codes d'erreur soient bien établis — bits de parité et codes cycliques, par exemple. Voici une brève description de certains choix qu'il convient d'opérer en matière de télécommunications pour créer un réseau de stations météorologiques automatiques.

Communication unidirectionnelle

Pour un réseau de stations automatiques relativement simple, il suffit d'utiliser le mode de télécommunication unidirectionnel. Dans un tel cas, les stations isolées fonctionnent suivant un cycle bien établi, ou alors quand des conditions particulières déclenchent le processus, pour recueillir les signaux de leurs différents capteurs, appeler par téléphone le

centre de commande et l'ordinateur chargé de l'acquisition des données, s'assurer que la connexion est bien établie, et transmettre les messages de données. Chaque station automatique peut disposer d'une interface série reliée à un modem analogique lui permettant de transmettre les données à un débit d'environ 9 600 bits par seconde en audiofréquences. Ce type de communications point à point présente l'avantage de faire appel à une technologie simple et bien établie et de ne nécessiter que des lignes téléphoniques ordinaires. Le coût qui devrait être relativement faible est fonction de la formule tarifaire appliquée tenant compte de la distance et de la durée de la communication. Les inconvénients que présente cette solution sont les suivants: une sécurité des données modérée, des volumes de données obligatoirement assez faibles, la nécessité de s'en tenir à une architecture de réseau peu puissante et le fait que les sociétés chargées des télécommunications risquent à l'avenir de restreindre l'accès aux circuits de données analogiques étant donné que les réseaux numériques à large bande tendent à s'imposer inexorablement.

Communication bidirectionnelle

Un réseau offrant davantage de puissance dispose d'un mode de télécommunication bidirectionnel qui permet à l'ordinateur central de recueillir les données des stations du réseau non seulement aux heures synoptiques ou chaque heure, mais aussi de façon ponctuelle quand un prévisionniste ou un hydrologiste a besoin de connaître les conditions météorologiques qui règnent au moment même en un ou plusieurs lieux. Comme précédemment, les stations automatiques déclenchent le processus de transmission en temps réel de messages d'urgence quand les conditions l'exigent. La communication bidirectionnelle permet aussi à la station isolée d'envoyer des messages d'ordre pour modifier son mode de fonctionnement ou pour déclencher le téléchargement d'un nouveau logiciel d'exploitation sur son processeur.

Création d'un réseau de stations météorologiques automatiques

La transmission au sein d'un tel réseau peut être assurée par l'intermédiaire de lignes terrestres ou d'ondes radioélectriques (en particulier pour les sites très isolés) voire les deux. Il y a tout intérêt à faire appel à un prestataire de services en télécommunications qui se charge entièrement de la maintenance du réseau et probablement des interfaces de communication, et répondre en outre rapidement aux avis de panne émanant du responsable du réseau de stations météorologiques automatiques. Il est à noter qu'il est bon de pouvoir déterminer de quel côté de l'interface de communication (station automatique ou circuits de télécommunications) se

situe une panne, ce qui peut poser problème. Les réseaux de stations automatiques utilisent souvent des liaisons téléphoniques, via le réseau téléphonique public commuté, dont le coût est fonction de la distance et de la durée des appels, ainsi que des tarifs pratiqués par le fournisseur d'accès local. Une autre solution consiste à créer un réseau de type « réseau privé » utilisant des lignes louées spécialisées d'une qualité bien définie. En voici les avantages: le temps de traitement de la commutation disparaît, il est possible de disposer d'un débit bien supérieur et il y a peu de doutes sur la maintenance effective des circuits. Le coût de la location est fonction de la longueur de la ligne et non pas du volume des données. Les coûts sont plus importants que dans le cas d'un réseau commuté quand le volume des données est relativement faible.

Réseau numérique avec intégration de services

Les réseaux numériques avec intégration de services mis en place par bon nombre de compagnies de télécommunications offrent la possibilité de transmissions phoniques, de données et vidéos en modulation par impulsions et codage par l'intermédiaire des câbles et centres de commutation de réseaux téléphoniques publics commutés évolués. Un canal de base permet ainsi la transmission de données à un débit de 64 kbit/s, suivant les protocoles de commutation par paquets X.25 ou en relais de trame. Les circuits numériques offrent une grande sécurité pour la transmission des données.

Communications par réseau étendu

Compte tenu de l'augmentation du volume de données transmises dans le monde et de l'utilisation de protocoles modernes de communication, mais aussi de l'augmentation des capacités informatiques et de stockage de données des terminaux distants, il est à présent normal de considérer une station météorologique automatique isolée et l'ordinateur central de commande et d'acquisition des données comme les noeuds d'un réseau étendu. Les données ou les messages de commande sont divisés en paquets en application de règles telles que le protocole X.25 ou les services à relais de trame encore plus rapides. Les différents paquets de données sont acheminés par le réseau de commutation de données du fournisseur d'accès aux services de télécommunications et peuvent arriver à destination par différents itinéraires (la répartition de paquets sans relation garantissant une utilisation efficace du réseau). À destination, les paquets sont rassemblés grâce au protocole, après des temps d'attente variables, pour reconstituer ainsi le message d'origine. Une fonction de détection d'erreurs avec renvoi automatique de paquets corrompus ou perdus garantit la fiabilité des transmissions. Il y a lieu de noter le contraste entre cette méthode

et celle utilisant les réseaux téléphoniques publics commutés ordinaires reposant sur la technologie de la commutation de circuits et selon laquelle une liaison spécialisée est attribuée à une transmission entre deux parties. La commutation de circuits est idéale quand des données en temps réel (un signal audio ou vidéo par exemple) doivent être transmises rapidement et arriver dans l'ordre dans lequel elles ont été émises. La commutation de paquets présente une meilleure efficacité et une meilleure fiabilité quand il s'agit de données pouvant accuser un léger temps de retard dans la transmission. Le coût de la transmission des messages est fonction de la durée de la communication et du volume des données. Il y a lieu de prévoir un moyen de mettre fin à coup sûr à la communication une fois que les données sont rassemblées à destination, car en cas de défaillance de la station automatique, la ligne reste ouverte ce qui se traduit par un supplément de coût indésirable.

Relayage de trames et mode de transfert asynchrone

Le relayage de trames est un protocole à commutation de paquets utilisés pour les échanges inter-sites dans le cadre d'un réseau étendu, permettant un débit de données qui se situe entre 64 kbit/s et 2 Mbit/s, voire plus en fonction de la qualité de la liaison. Par opposition à une liaison point à point par ligne directe, une commutation entre réseaux intervient entre la station météorologique automatique et l'ordinateur central. En réalité, une ligne directe est reliée à un nœud dans le réseau de données à relais de trames et l'emplacement distant est doté d'une ligne directe vers un nœud à relayage de trames. L'utilisateur dispose ainsi d'un réseau privé virtuel. Dans ce cas, les coûts diminuent et ne sont fonction ni du volume de données, ni de la durée de la communication. Il faut noter toutefois que, dans certaines régions, le relayage de trames cède la place à des technologies plus récentes et plus rapides, notamment au mode de transfert asynchrone (ATM). Le protocole ATM tente de combiner à la fois les avantages des réseaux à commutation de circuits pour la garantie qu'ils offrent s'agissant de la livraison des données et ceux des réseaux à commutation de paquets pour leur fiabilité et leur efficacité.

Protocole de transmission

Le protocole de commande de transmission/protocole Internet (TCP/IP) constitue de fait une norme en matière de communication entre ordinateurs de différents réseaux. Le protocole Internet (IP) définit le format des paquets appelés « datagrammes » ainsi que le plan d'adressage. Le protocole TCP de niveau supérieur établit une connexion virtuelle entre l'expéditeur et le destinataire qui permettent la transmission de flux bidirectionnels de données de façon que les datagrammes soient livrés dans l'ordre

correct et qu'il soit possible de corriger les erreurs et de demander une nouvelle transmission. Le TCP gère aussi les transmissions de données entre les applicatifs. L'Internet fonctionne sur la base des protocoles TCP/IP et le protocole IP est utilisé aussi par les réseaux étendus dont les nœuds disposent de capacités de traitement, pour l'échange de gros volumes de données sur le réseau. Grâce au protocole IP, il est possible notamment de transmettre aux autorités chargées des réseaux routiers, sur un réseau Intranet privé, les analyses exécutées par l'ordinateur central portant sur les données des stations météorologiques automatiques sur les conditions routières.

Liaison commutée ou liaison spécialisée

Une décision s'impose: faut-il choisir une liaison à commutation de circuits, moins onéreuse, avec un accès au réseau de télécommunications à partager avec d'autres utilisateurs, ou louer une ligne spécialisée, bien plus chère, mais qui offre des communications fiables, à grande vitesse et en temps réel ? Avec le réseau à commutation de circuits, il faut s'attendre à une certaine latence, le délai d'établissement de la liaison pouvant atteindre quelques secondes, ce qui, cependant, ne pose pas de difficulté particulière aux protocoles de commutation de paquets. Les critères qui contribueront à fixer le choix sont notamment: la fiabilité des communications, le volume de données à échanger que contiennent chaque message ou les téléchargements spéciaux requis par les stations isolées, ainsi que la nécessité de disposer des données en temps réel pour les besoins de l'exploitation. La saisonnalité des besoins a aussi une influence sur le choix du mode de communication. Si par exemple des données météorologiques qui déterminent les conditions routières ne sont essentielles que quelques mois par an, mais sont fournies par une station connectée toute l'année au réseau par une liaison spécialisée, alors le coût global par message est élevé. En réalité, le prix du message est fonction des formules tarifaires appliquées par le fournisseur d'accès et varie suivant de facteurs tels que le débit, la distance de liaison, la durée de la communication et le fait que les modems soient ou non mis à disposition par ce fournisseur. Les fournisseurs d'accès locaux seront tout disposés à donner tous les détails au sujet des services qu'ils proposent.

1.3.2.11 Maintenance et étalonnage

Le logiciel d'application comporte des programmes spécifiques qui permettent la maintenance et l'étalonnage sur site. Pour procéder à ces opérations, il faut généralement faire tourner des programmes interactifs qui permettent de tester tel capteur, de reconfigurer la station après le remplacement de capteurs ou de modèles, de rétablir les paramètres système, de tester les télécommunications, d'introduire de nouvelles constantes d'étalonnage, etc. En

général, la maintenance et l'étalonnage se font hors ligne, en interrompant temporairement le fonctionnement normal de la station.

1.3.2.12 Affichage de données

Outre les programmes d'affichage de données pour les diverses fonctions citées ci-dessus, les caractéristiques de fonctionnement indiquent souvent la nécessité d'afficher certaines données localement sur des afficheurs à diodes électroluminescentes, sur les terminaux existants ou sur des écrans spéciaux, avec mise à jour en temps réel ou sur demande. On peut prendre comme exemple les stations météorologiques automatiques installées sur des aérodromes ou dans des centres de surveillance de l'environnement. Dans certains pays, l'impression de données ou l'enregistrement graphique par des enregistreurs papier est obligatoire.

1.4

CHOIX D'UN SITE POUR UNE STATION MÉTÉOROLOGIQUE AUTOMATIQUE

Le choix d'un site pour une station automatique est une tâche très difficile; il reste d'ailleurs beaucoup de recherches à faire dans ce domaine. Selon le principe général, une station devrait fournir des mesures qui sont et restent représentatives de la zone avoisinante, dont l'étendue dépend de l'application météorologique considérée. Les directives actuelles concernant les stations traditionnelles s'appliquent aussi aux stations automatiques. C'est pourquoi nous renvoyons le lecteur à la Partie I du présent Guide ainsi qu'à d'autres guides et manuels de l'OMM (OMM-N° 488, 544 et 731).

Certaines stations météorologiques automatiques ne sont visitées que rarement. C'est le cas de stations terrestres ou maritimes difficiles d'accès. Le prix de construction de telles stations peut être très élevé, et le coût de desserte de celles-ci peut impliquer des frais supplémentaires. Ces stations sont parfois alimentées en électricité par des sources très peu fiables ou à partir de sites ne disposant pas d'une alimentation électrique permanente. Il faut prévoir que des appareils de télécommunications y seront installés. Il faut également prendre en compte des mesures de protection (contre la foudre, les inondations, le vol, le vandalisme, etc.) et les stations doivent évidemment pouvoir supporter des conditions météorologiques extrêmes. Le coût de systèmes susceptibles de fonctionner dans toutes les conditions prévisibles pour une station automatique est prohibitif. Il est donc essentiel, avant de concevoir une station ou d'en établir les spécifications, de bien comprendre le milieu dans lequel elle sera appelée à fonctionner. Il faut, très tôt dans le processus de planifica-

tion, procéder à une analyse détaillée de l'importance relative des caractéristiques météorologiques et techniques requises afin que les sites puissent être choisis et considérés comme convenables avant que des sommes importantes soient consacrées à leur construction.

1.5 **TRAITEMENT DE DONNÉES PAR UN SYSTÈME CENTRAL DE GESTION DE RÉSEAU**

Une station météorologique automatique, qui fait généralement partie d'un réseau de stations météorologiques, transmet les données traitées ou les messages à un système central de gestion de réseau par l'intermédiaire de divers moyens de télécommunication. L'établissement des caractéristiques fonctionnelles, et donc des spécifications techniques, d'un système central est une tâche complexe, souvent sous-estimée. Celle-ci exige une collaboration étroite entre les concepteurs de stations, les spécialistes des télécommunications, les spécialistes des logiciels et les utilisateurs des données. Des décisions doivent être prises quant aux tâches à exécuter par le système central et par les stations. En effet, selon les applications, certaines fonctions d'une station automatique peuvent être attribuées au système central, qui dispose de plus de puissance et de mémoire. On peut prendre comme exemple de longs calculs mathématiques, tels que ceux nécessaires pour la réduction de la pression atmosphérique et le codage des messages météorologiques. Les mémoires tampons des stations automatiques peuvent être réduites à un minimum opérationnel si les données sont régulièrement transmises au système central. Il est bon de définir, dans un premier temps, les caractéristiques fonctionnelles à la fois du système central et des stations automatiques, pour qu'elles concordent, avant d'en définir les caractéristiques techniques.

1.5.1 **Composition du système**

La composition d'un système central de gestion de réseau dépend en grande partie des fonctions à exécuter, mais aussi des installations locales. On peut faire appel à de puissants ordinateurs personnels ou postes de travail multitâche et multi-utilisateur travaillant en temps réel. On peut aussi employer les systèmes de télécommunications et de traitement existants. Les systèmes centraux de gestion de réseau sont de plus en plus souvent intégrés à un réseau local, ce qui permet de distribuer et de faire exécuter les tâches à l'endroit le plus pratique, par les personnes les plus compétentes.

Les principales fonctions d'un système central de gestion de réseau sont l'acquisition de données, y compris le décodage des messages en provenance du réseau de stations automatiques, la télécommande et la télémaintenance des stations, le contrôle du réseau et de la qualité des données, le retraitement des données pour répondre aux besoins des utilisateurs, l'accès à la base de données du réseau, l'affichage des données et leur transfert vers des utilisateurs internes ou externes. Ce transfert peut s'effectuer par le Système mondial de télécommunications si les données sont échangées sur le plan international.

1.5.2 **Contrôle de la qualité des données passant par le réseau**

Ce sujet est approfondi dans le chapitre 1 de la Partie III. Il est recommandé aux opérateurs de réseaux¹⁸ :

- a) D'établir et de mettre à l'essai des systèmes de surveillance des mesures en temps quasi réel qui testent à intervalle régulier les valeurs obtenues par rapport aux champs analysés correspondants du même emplacement de mesure ;
- b) D'établir de bonnes procédures de liaison entre le service de surveillance et les services appropriés de maintenance et d'étalonnage afin d'accélérer les réactions aux messages d'erreur ou de panne provenant du système de surveillance.

Les procédures de contrôle automatique de la qualité dans les stations météorologiques automatiques ont leurs limites. Des erreurs peuvent ne pas être détectées, même par les systèmes de contrôle les plus perfectionnés, par exemple la dérive à long terme des capteurs et des modules. La transmission des données émanant d'une station automatique est une autre source d'erreur possible. Il est donc recommandé de faire exécuter d'autres opérations de contrôle de la qualité par un système de contrôle du réseau faisant partie du système central de gestion de réseau. Les opérations de contrôle de la qualité d'une importance primordiale qu'un tel système doit pouvoir accomplir sont :

- a) La détection des erreurs de transmission de données, les programmes nécessaires dépendant du protocole de transmission et des codes de redondance cyclique employés ;
- b) La vérification de la structure et du contenu des messages codés de l'OMM (OMM-N° 305) ;
- c) Le retraitement des données pour exclure ou traiter d'une autre façon les données signalées comme étant erronées ou suspectes par les fichiers de service des stations météorologiques.

¹⁸ Recommandation 5 (CIMO-IX) formulée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation lors de sa neuvième session (1985).

Des systèmes d'affichage interactifs permettent également d'effectuer un contrôle complémentaire de la qualité des données reçues. Des séries chronologiques concernant une ou plusieurs variables et une ou plusieurs stations peuvent être affichées sur des écrans couleur et un personnel compétent et expérimenté peut faire appel à l'analyse statistique pour détecter des anomalies à court et à long terme qui ne sont pas toujours décelées par les algorithmes entièrement automatiques de contrôle de la qualité.

Des algorithmes de contrôle qui permettent de tester régulièrement les valeurs reçues, dans l'espace et dans le temps, par rapport à un champ numérique analysé constituent des outils très puissants pour identifier les erreurs et lancer, selon le besoin, des opérations de recherche ou de correction. Les faibles fluctuations turbulentes de la pression atmosphérique et le degré de confiance avec lequel on peut supprimer les influences géographiques locales en normalisant toutes les observations par rapport à un niveau de référence commun font de la pression atmosphérique un candidat idéal pour ce type de contrôle de la qualité. En établissant la moyenne dans l'espace et dans le temps des observations, on devrait également pouvoir soumettre d'autres variables à cette analyse. De toute manière, il y a lieu de tenir soigneusement compte des effets orographiques.

1.6

MAINTENANCE

Le coût de la maintenance d'un réseau de stations automatiques terrestres et a fortiori maritimes peut être nettement supérieur au prix d'achat des stations. Il est donc essentiel de concevoir des stations météorologiques automatiques d'une fiabilité et d'une « maintenabilité » maximales. Une protection particulière contre les conditions environnementales se justifie souvent, même si elle implique des coûts initiaux plus élevés.

Tout système complexe nécessite manifestement un travail de maintenance et notamment de maintenance corrective en cas de défaillance de composants. Plusieurs raisons font que les éléments matériels tombent en panne; les programmes informatiques peuvent aussi ne pas fonctionner correctement en raison d'erreurs de conception que l'on peut mettre du temps à déceler. La bonne organisation de la maintenance préventive permet de réduire au minimum les interventions de maintenance corrective et d'améliorer les performances des stations météorologiques automatiques. La maintenance préventive s'applique à tous les composants du système, et cela ne se limite pas au nettoyage et à la

lubrification de pièces mécaniques. Compte tenu de la fiabilité croissante des composants électroniques des stations automatiques, le travail de maintenance portera essentiellement sur la prévention, y compris l'entretien et l'étalonnage des capteurs.

La maintenance doit s'adapter pour tenir compte de l'évolution rapide de la technologie, mais aussi du problème de la disponibilité des pièces de rechange après quelques années. En effet, il arrive souvent que les frais de réparation et le coût des pièces augmentent rapidement dès lors qu'un système n'est plus distribué et que, la recherche de la bonne pièce de rechange demeurant infructueuse, il devient nécessaire de remplacer les anciens modules par de nouveaux relevant d'une technique différente. On peut prendre comme exemple le transfert de données d'un support d'enregistrement à un autre, le transfert de programmes et de systèmes d'exploitation d'un processeur à un autre, le remplacement de modules pour assurer la fiabilité du système, l'ajout de nouveaux systèmes de télécommunications pour assurer la connexion, etc. C'est pour réduire les frais de maintenance de ce type qu'il est souhaitable d'établir des normes largement acceptées s'appliquant au matériel, aux interfaces et aux logiciels et de les inclure dans les spécifications techniques des stations météorologiques automatiques.

Comme la maintenance d'un réseau de stations automatiques est une tâche souvent largement sous-estimée, il est essentiel d'organiser celle-ci selon un plan rationnel qui définit en détail toutes les fonctions et les prévoit de façon à minimiser les frais sans nuire aux performances. Compte tenu de la structure modulaire d'un grand nombre de stations automatiques modernes, il est possible d'exécuter la maintenance sur le terrain ou dans des centres régionaux ou nationaux.

- *Maintenance sur le terrain* : En général, il n'est pas conseillé de réparer des capteurs ou autres modules d'une station automatique sur le terrain, car les conditions n'y sont pas favorables à un travail efficace. En outre, en raison du coût élevé de la main-d'œuvre et du coût relativement faible du matériel, il est souvent plus rentable de mettre au rebut des modules défectueux que de les réparer. Il est recommandé de confier la maintenance corrective sur le terrain au personnel technique spécialisé d'un centre régional ou du centre national, selon l'étendue du pays considéré, et la maintenance préventive simple aux observateurs, s'il y en a sur place. La transmission périodique de données diagnostiques d'autocontrôle par la station est un excellent moyen d'assurer une intervention rapide en cas d'anomalie.

- *Centres régionaux* : Le personnel technique d'un centre régional devrait pouvoir remplacer ou réparer les modules et les capteurs dont il convient de diagnostiquer et d'éliminer de simples défauts. Ce personnel devrait bien connaître le fonctionnement du matériel de la station et avoir la formation nécessaire pour effectuer des opérations de maintenance sur les logiciels. Les centres régionaux devraient disposer des appareils de contrôle nécessaires et d'un nombre suffisant de modules et de capteurs de rechange pour assurer la maintenance des stations qui en relèvent. Ces centres ont besoin de moyens de transport adaptés pour réaliser le travail nécessaire sur le terrain. Il leur incombe de prévoir des visites périodiques de contrôle des sites éloignés (bon fonctionnement, vandalisme, conditions sur place, changements, etc.). Il est nécessaire d'y établir des procédures s'appliquant aux visites d'urgence aux diverses stations, en fonction de la priorité fixée à la station.

- *Centre national* : Un centre national doit disposer d'un personnel technique plus qualifié, capable de détecter et de résoudre des problèmes complexes touchant les capteurs, les modules et les moyens de transmission de données. L'équipement nécessaire pour contrôler et réparer toutes les pièces d'une station météorologique automatique devrait y être disponible, le travail s'effectuant dans le centre. Toute anomalie qui se reproduit régulièrement, indiquant un défaut de conception, doit être signalée aux constructeurs ou aux distributeurs afin qu'ils y remédient.

Comme le logiciel joue un rôle très important dans chaque station automatique et dans le système central de gestion de réseau, un personnel ayant une connaissance approfondie de celui-ci est nécessaire. Le matériel nécessaire pour la création et l'essai de logiciels doit être disponible. En outre, le centre national devrait pouvoir exécuter l'ensemble des tâches de maintenance adaptive.

En ce qui concerne le contrôle de la qualité des données passant par le réseau, il est souhaitable d'établir des liens étroits entre le service de contrôle et le service de maintenance et d'étalonnage pour favoriser une réaction rapide en cas d'anomalie ou de panne signalée par le système de contrôle.

Le schéma établi ci-dessus est valable pour les grands pays. Dans les pays plus modestes, les tâches des centres régionaux peuvent être assumées par le centre national. Les pays en développement peuvent envisager de prendre, en matière de maintenance, des dispositions communes avec des pays voisins. Un centre international commun de maintenance peut être envisagé afin que les coûts de maintenance restent suffisamment faibles. Cependant, une telle coopération internationale exigerait sans doute

l'emploi d'un matériel semblable. Si un Service météorologique se trouve dans l'impossibilité d'accroître son personnel ou de développer ses installations, il peut sous-traiter bon nombre des fonctions d'appui. Cet appui pourrait par exemple être négocié lors de l'acquisition des systèmes. Cependant, un contrat de maintenance devrait être préparé très soigneusement et son exécution devrait être minutieusement vérifiée par du personnel compétent.

On trouvera, dans le chapitre 1 de la Partie III, des suggestions en ce qui concerne les techniques de gestion de la qualité.

1.7 ÉTALONNAGE

D'une façon générale, les capteurs, et plus particulièrement ceux des stations météorologiques automatiques, qui produisent des signaux électriques, présentent une dérive instrumentale. C'est pourquoi il faut les contrôler et les étalonner régulièrement. En principe, l'intervalle d'étalonnage est déterminé par les caractéristiques de cette dérive indiquées par le constructeur et par l'exactitude requise. Les comparaisons internationales d'instruments organisées par l'OMM donnent également des indications objectives quant à la dérive instrumentale des capteurs et aux intervalles d'étalonnage souhaitables. Étant donné que les modules de conditionnement des signaux, le matériel d'acquisition de données et le matériel de transmission font aussi partie de la chaîne de mesure, leur stabilité et leur fonctionnement doivent également faire l'objet de contrôles ou d'étalonnages périodiques. Le résumé qui suit se limite à certains aspects pratiques touchant les stations météorologiques automatiques. On trouvera des renseignements plus détaillés sur les techniques et méthodes d'étalonnage dans les divers chapitres de la Partie I et dans le chapitre 4 de la Partie III du présent Guide.

- *Étalonnage initial* : On oublie facilement qu'il y a lieu de disposer d'installations et d'instruments nécessaires à l'étalonnage avant même de se procurer et d'installer une station météorologique automatique afin qu'on puisse contrôler les spécifications indiquées par le constructeur, tester les performances globales de la station et vérifier si le transport n'a pas influé sur les caractéristiques de mesure du matériel.

- *Inspection sur le terrain* : Une comparaison périodique des capteurs d'une station météorologique automatique avec des étalons voyageurs apportés à la station est absolument nécessaire pour contrôler les performances des capteurs. Il faut employer de préférence des étalons voyageurs à lecture numérique ayant des caractéristiques de filtrage semblables

à celles de la chaîne de mesure de la station. Dans de nombreux pays, on se sert de deux étalons voyageurs du même type pour éviter tout problème de variation de l'exactitude imputable au transport. Pour qu'on puisse détecter de faibles dérives, les étalons doivent avoir une exactitude nettement supérieure à celle du capteur à contrôler et doivent être installés dans les mêmes conditions ambiantes que les capteurs suffisamment longtemps avant l'opération de comparaison. Comme les modules de conditionnement des signaux et les appareils d'acquisition de données tels que le numériseur peuvent également subir une dérive, des sources de référence électriques et des contrôleurs universels devraient être employés pour repérer les anomalies.

Avant et après les inspections sur le terrain, les étalons voyageurs et les sources de référence doivent être comparés aux étalons de travail du laboratoire d'étalonnage. Le service de maintenance doit être averti dès que possible si un écart d'exactitude est détecté.

- *Étalonnage en laboratoire* : Avant d'être réutilisé, un instrument doit subir un étalonnage en laboratoire dans les trois cas suivants: quand la fin de son intervalle de réétalonnage est atteinte, quand une inspection sur le terrain a fait apparaître un écart d'exactitude supérieur aux limites admises et quand il vient d'être réparé par le service de maintenance. L'étalonnage des capteurs sera effectué en atmosphère contrôlée (caisson climatique) au moyen d'étalons de travail appropriés. Ces étalons doivent être périodiquement comparés et étalonnés par rapport à des étalons secondaires, notamment pour qu'il soit possible de les raccorder aux étalons internationaux.

Il faut aussi veiller à l'étalonnage des divers éléments de la chaîne de mesure et de télémetrie, et notamment des modules de conditionnement des signaux. Il faut disposer pour cela d'étalons adaptés de tension, d'intensité, de capacité et de résistance, d'un appareillage d'essai des transmissions et de multimètres numériques de grande exactitude. L'étalonnage exige des instruments et des systèmes d'acquisition de données d'une grande exactitude. Il est souhaitable de faire appel à un ordinateur pour calculer les constantes d'étalonnage. Ces constantes, qui restent caractéristiques du capteur ou du module considéré jusqu'à l'étalonnage suivant, doivent être mémorisées dans la station dès qu'un capteur ou un module y est installé, en remplacement d'un autre par exemple, au cours d'une intervention de maintenance sur site.

Il convient de fixer un échéancier pour la comparaison périodique des étalons secondaires du laboratoire d'étalonnage avec les étalons primaires nationaux, internationaux ou régionaux de l'OMM.

1.8

FORMATION

Le fonctionnement d'une station météorologique automatique reposant sur l'application de technologies très différentes de celles utilisées dans les stations et réseaux traditionnels, il va de soi qu'il faut prévoir une refonte totale des programmes de formation existants et une analyse précise des compétences que le personnel technique nécessaire devra posséder. Tout nouveau programme de formation doit être organisé selon un plan rationnel correspondant aux besoins des utilisateurs. Il doit porter notamment sur les opérations de maintenance et d'étalonnage mentionnées ci-dessus et doit être adapté au système considéré. Le recyclage du personnel existant, même si celui-ci possède de nombreuses années d'expérience des stations traditionnelles, n'est pas toujours possible et risque de créer de sérieux problèmes si ce personnel n'a pas de connaissances de base en matière de capteurs électriques, de techniques numériques, de microprocesseurs et d'informatique. Le recrutement d'un nouveau personnel ayant ces connaissances peut se révéler nécessaire. Un personnel compétent dans les divers domaines imposés par les stations automatiques doit être présent bien avant la mise en place d'un réseau de stations météorologiques automatiques (voir OMM/TD-N° 862).

Il incombe aux constructeurs de systèmes de stations météorologiques automatiques de fournir une documentation technique et d'exploitation très complète et d'organiser des cours de formation en matière de technique et d'exploitation. En général, il est demandé deux ensembles de documents aux constructeurs: des manuels d'utilisation, qui permettent une formation opérationnelle et servent de guide d'emploi du système, et des manuels techniques, plus complexes, qui présentent de façon très détaillée les caractéristiques de fonctionnement du système jusqu'au niveau du bloc et même du composant électronique et donnent des instructions pour la maintenance et la réparation. Ces manuels peuvent être considérés comme la documentation de base des programmes de formation organisés par le constructeur du système considéré. Ils doivent pouvoir servir d'ouvrages de référence lorsque les spécialistes du constructeur n'offriront plus une assistance directe.

Certains pays auraient intérêt à organiser des cours de formation communs dans un centre de formation desservant plusieurs pays voisins. L'idéal serait évidemment qu'un tel centre soit associé à un centre d'instruments désigné et que les pays desservis soient convenus d'utiliser un équipement normalisé semblable.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Organisation météorologique mondiale, 1954 : *Reduction of Atmospheric Pressure*. Note technique N° 7, OMM-N° 36, TP 12, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1964 : *Note on the Standardization of Pressure Reduction Methods in the International Network of Synoptic Stations*. Note technique N° 61, OMM-N° 154, TP 74, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1968 : *Methods in Use for the Reduction of Atmospheric Pressure*. Note technique N° 91, OMM-N° 226, TP 120, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1983 : *Guide des pratiques climatologiques*. Deuxième édition, partie I, chapitre 2, OMM-N° 100, Genève (+ mises à jour sur: http://www.wmo.ch/pages/prog/wcp/ccl/guide/guide_climat_practices.html).
- Organisation météorologique mondiale, 1987 : *Some General Considerations and Specific Examples in the Design of Algorithms for Synoptic Automatic Weather Stations* (D.T. Acheson). Rapport N° 19 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 230, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988a : *Règlement technique*. OMM-N° 49, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988b : *WMO International Ceilometer Intercomparison* (Royaume-Uni, 1986) (D.W. Jones, M. Ouldridge et D.J. Painting). Rapport N° 32 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 217, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989a : *Guide du Système mondial d'observation*. OMM-N° 488, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989b : *WMO International Hygrometer Intercomparison* (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe et K. Smedstud). Rapport N° 38 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 316, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989c : *Preliminary results of the WMO automatic sunshine duration measurement comparison 1988/89 in Hamburg* (K. Dehne). Qatrième Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECIMO IV). Rapport N° 35 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 303, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990a : *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements* (Royaume-Uni, 1988/1989) (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldridge et W.R. Sparks). Rapport N° 41 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 401, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990b : *Guide des Systèmes d'observation et de diffusion de l'information météorologique aux aérodromes*. OMM-N° 731, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1991 : *Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data* (D.J. Painting). Rapport N° 47 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 452, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992a : *Vocabulaire météorologique international*. Deuxième édition, OMM-N° 182, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992b : *The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison : Final Report* (J.P. van der Meulen). Rapport N° 46 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 474, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993 : *Guide du Système mondial de traitement des données*. OMM-N° 305, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1994 : *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison: Preliminary Results* (B.E. Goodison, E. Elomaa, V. Golubev, T. Gunther et B. Sevruk). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation* (TECO-94). Rapport N° 57 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 588, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel des codes*, volumes I.1 et I.2, OMM-N° 306, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1997 : *Guidance on Automatic Weather Systems and their Implementation*. Rapport N° 65 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 862, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2000 : *Operation of automated surface observing systems in harsh climatological environments* (M.D. Gifford, G.M. Pearson et K. Hegg). *Communications présentées à la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation météorologiques et environnementaux* (TECO-2000). Rapport N° 74

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1028, Genève.

- Organisation météorologique mondiale, 2003a : *Manuel du Système mondial d'observation*. OMM-N° 544, Genève.

- Organisation météorologique mondiale, 2003b : *Algorithms Used in Automatic Weather Stations: Evaluation of Questionnaire* (M.D. Gifford). Rapport N° 78 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 1160, Genève.

CHAPITRE 2

MESURES ET OBSERVATIONS AUX STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES AÉRONAUTIQUES

2.1 GÉNÉRALITÉS

2.1.1 Définitions

Ce chapitre traite des besoins concernant les observations effectuées dans les stations météorologiques aéronautiques ainsi que des instruments et des méthodes utilisés. Alors que les observations synoptiques ont pour but de déterminer en un lieu une valeur représentative d'une région relativement étendue, les observations météorologiques destinées à l'aéronautique sont souvent effectuées avec une plus grande fréquence et en plusieurs emplacements d'un aérodrome et de ses alentours pour fournir des données représentatives de zones plutôt limitées comme les aires d'approche, d'atterrissage et de décollage.

Les mesures météorologiques à effectuer sont pour l'essentiel les mêmes que celles qui sont réalisées pour les autres applications et décrites dans d'autres chapitres de ce Guide, à l'exception de la portée visuelle de piste (RVR¹), de la portée visuelle oblique et du cisaillement du vent dans les basses couches, paramètres qui sont propres à cette application.

2.1.2 Unités

Pour les besoins de l'aéronautique, les unités utilisées pour la mesure et la transmission des valeurs météorologiques sont les mêmes que pour les autres applications à deux exceptions près :

- (a) le vent en surface peut être mesuré et rapporté en mètres par seconde, en kilomètres par heure ou en nœuds² et la direction du vent³ en degrés mesurés par rapport au nord géographique⁴ dans le sens des aiguilles d'une montre (voir section 2.2.1) ;
- (b) la hauteur de la base des nuages peut être mesurée en mètres ou en pieds.

¹ L'acronyme anglais RVR est aussi utilisé comme acronyme pour Portée Visuelle de Piste en français.

² Les unités de vitesse du vent utilisées sont déterminées par décision nationale. Cependant, l'unité prescrite par le Règlement Technique, volume II (OMM, 2007) pour cette vitesse est le kilomètre par heure. Le nœud pouvant être utilisé comme unité n'appartenant pas au SI jusqu'à la décision qui doit être prise prochainement par l'OACI.

³ Direction d'où le vent de surface souffle.

⁴ Comme la direction du vent donnée pour l'atterrissage ou le décollage des avions peut être convertie en degrés magnétiques, l'unité affichée au service du trafic aérien présente habituellement la direction par rapport au nord magnétique.

Le choix des unités dépend de la pratique nationale et est fonction des besoins des autorités aéronautiques.

2.1.3 Besoins

Les exigences officielles relatives aux observations aéronautiques sont spécifiées dans le *Règlement Technique*, volume II [C.3.1], (OMM, 2007). Les détails concernant les méthodes et pratiques se trouvent dans (OMM, 2006). (OMM, 1990) contient des conseils utiles pour l'observation et le suivi des conditions météorologiques. Une attention particulière devrait être portée aux stations météorologiques établies sur des structures offshore en support à des opérations héliportées (ICAO, 1996).

Les exigences concernant l'incertitude, la résolution et la portée des mesures météorologiques, ainsi que les performances actuellement atteignables, sont énoncées au chapitre 1, partie I (et partiellement dans le *Règlement Technique* de l'OMM [C.3.1], supplément A).

Malgré les excellentes performances des avions modernes, les facteurs météorologiques jouent toujours un rôle important pour leurs opérations. La fiabilité et la représentativité des observations sur les aérodromes sont très importantes pour assurer les atterrissages et les décollages en toute sécurité. De l'observation du vent dépendront la sélection de la piste et le poids maximal autorisé à l'atterrissage et au décollage. La température est également importante et sa valeur influence les performances des moteurs. Elle pourrait conduire à diminuer la charge emportée ou exiger une piste plus longue pour le décollage, principalement pour les aéroports situés en pays chauds.

Des observations de routine doivent être effectuées aux stations météorologiques aéronautiques aux heures et à la fréquence déterminées par le pays membre pour répondre aux besoins de la navigation aérienne nationale et internationale, en tenant dûment compte des accords régionaux de navigation aérienne. Des observations spéciales et d'autres observations non routinières doivent être effectuées selon ces mêmes principes. Il est souhaitable d'effectuer les observations de routine à des intervalles d'une heure ou d'une demi-heure, sur toute la journée ou une partie de celle-ci, ou selon les besoins de l'exploitation des aéronefs. Les observations spéciales seront faites quand des changements spécifiques

se rapportant au vent de surface, à la visibilité, à la portée visuelle de piste (RVR), au temps présent et/ou à la couverture nuageuse interviennent entre les observations de routine. Ces changements sont repris dans le *Règlement technique* [C.3.1], appendice 3, 2.3.2. Ces observations, reprises sous forme de messages codés de type METAR ou SPECI, sont échangées au plan international entre stations météorologiques aéronautiques. D'autres types de messages ne sont destinés qu'aux opérations aéronautiques et sont mis sous une forme décidée d'un commun accord entre autorités météorologiques et aéroportuaires.

Étant donné l'importance des observations météorologiques pour la sécurité de l'aviation, il est vital que les observateurs soient bien entraînés et possèdent une bonne acuité visuelle. La formation des observateurs devrait comprendre des cours de base et des cours de recyclage réguliers. La publication (OMM, 2002) contient des informations sur le contenu des cours.

L'implantation, l'installation et la nature des systèmes météorologiques, résumées ci-après, sont précisées dans le *Règlement technique* [C.3.1] 4, avec des spécifications techniques et des critères détaillés dans l'appendice 3. Ces spécifications sont résumées ci-dessous.

Le choix des emplacements où sont effectuées les observations ou de ceux où sont installés les instruments aux stations météorologiques aéronautiques doit être effectué avec un soin particulier afin que les valeurs mesurées soient représentatives des conditions régnant sur l'aérodrome ou dans son voisinage immédiat. Dans certains cas, lorsque des informations sont requises pour de grandes étendues, il peut être nécessaire de prévoir plusieurs emplacements pour certains instruments, de façon que les valeurs transmises soient représentatives de l'ensemble de la zone concernée. Par exemple, pour de longues pistes, ou pour de grands aérodromes comportant plusieurs pistes et où les aires d'approche, de prise de contact et de décollage peuvent être distantes de deux à cinq kilomètres, les valeurs de paramètres comme le vent, la hauteur de la base des nuages, la portée visuelle de piste (RVR), etc., déterminées à l'une des entrées de piste, peuvent être complètement différentes des conditions qui règnent en d'autres emplacements de cette piste ou au-dessus d'autres zones de l'ensemble des pistes utilisées pour les opérations aéronautiques.

À tous les aérodromes, les sites devraient être tels que les valeurs mesurées des différents paramètres météorologiques soient représentatives de l'aérodrome lui-même et/ou de la zone appropriée d'une

piste ou d'un complexe de pistes. Aux aérodromes où les opérations d'approche de précision et d'atterrissement ne sont pas pratiquées (pas d'instruments ou pistes sans approche de précision), ce critère de représentativité est moins restrictif qu'avec des pistes d'approche de précision (pistes de catégorie I, II ou III (voir OMM, 2006 et ICAO, 2004a)).

Lors du choix de l'emplacement des instruments sur les aérodromes et tout en veillant à ce que l'emplacement et l'exposition des instruments répondent aux exigences opérationnelles, il est particulièrement important de s'assurer que l'instrument lui-même ou son utilisation n'offrent aucun danger pour la navigation aérienne et que la présence ou le mouvement des aéronefs (roulant sur la piste, décollant, atterrissant, se rangeant, etc..) et la proximité des diverses installations aéroportuaires n'influencent pas indûment les valeurs mesurées.

Les types d'instruments utilisés, leurs caractéristiques et les méthodes employées pour la présentation et la transmission des valeurs mesurées des paramètres sont également importants. L'exposition, le fonctionnement et la maintenance des instruments météorologiques devraient être conformes aux procédures et spécifications décrites dans le présent Guide. Les stations météorologiques aéronautiques devraient être inspectées à des intervalles suffisamment rapprochés pour s'assurer que les observations sont toujours de haute qualité et que les instruments et tous leurs indicateurs fonctionnent correctement et pour vérifier si l'exposition des instruments a changé de manière significative (*Règlement Technique* [C.3.1.] 4.1.4).

Les instruments devraient être conçus de manière à transmettre à distance, aussi bien aux organes des services de la circulation aérienne qu'aux stations et centres météorologiques, les valeurs appropriées du vent de surface, de la température, du point de rosée, de la pression atmosphérique, du temps présent, de la visibilité, de la portée visuelle de piste (si les pistes sont équipées pour des atterrissages et décollages par temps de brouillard) et de la hauteur de la base des nuages, valeurs qui seront représentatives des conditions régnant sur les aires de prise de contact et d'envol concernées. Les systèmes instrumentaux automatiques destinés à la mesure de la hauteur de la base des nuages et de la portée visuelle de piste (RVR) revêtent une utilité particulière aux stations météorologiques aéronautiques.

Sur les aérodromes équipés de dispositifs permettant une approche de précision et en particulier quand les opérations en catégories II, III A et III B sont en vigueur et/ou sur des aérodromes où l'intensité du trafic est élevée, il sera préférable d'utiliser des systèmes

mes automatiques intégrés pour l'acquisition, le traitement, la diffusion et l'affichage en temps réel, des paramètres météorologiques affectant les opérations de décollage et d'atterrissement. Ces systèmes automatiques devraient permettre l'insertion manuelle de données météorologiques qui ne peuvent être mesurées automatiquement (*Règlement Technique* [C.3.1] 4.1.7 et 4.6.8.2). Les conditions que doivent remplir les systèmes automatiques d'observation météorologique sont énoncées dans le *Règlement technique* [C.3.1], appendice 3.

2.1.4 Méthodes

Les méthodes employées pour effectuer des mesures météorologiques aux aérodromes sont essentiellement les mêmes que pour les autres applications météorologiques décrites dans d'autres chapitres du présent Guide. Ce chapitre décrit certaines exigences en matière d'implantation et d'échantillonnage, ainsi que certains algorithmes, propres à l'application aéronautique.

2.2 VENT DE SURFACE

2.2.1 Généralités

Pour l'aviation, la mesure de la circulation de l'air et du cisaillement du vent dans les basses couches au voisinage des aires d'atterrissement et de décollage est d'un intérêt primordial. La réglementation est spécifiée dans le *Règlement technique* [C.3.1] 4.1, avec des détails dans l'appendice 3. Sur les aérodromes internationaux, les organes des services de la circulation aérienne (ATS), de la tour de contrôle et du contrôle d'approche sont normalement équipés d'indicateurs de la direction et de la vitesse du vent et les contrôleurs de la circulation aérienne fournissent ces informations aux aéronefs qui partent et arrivent. Afin d'assurer la compatibilité voulue, les indicateurs des organes ATS et de la station météorologique devraient être connectés aux mêmes capteurs.

Les mesures effectuées concernent la direction et la vitesse moyennes du vent ainsi que les rafales et les variations significatives spécifiées de la direction et de la vitesse du vent. Le contenu des comptes-rendus du vent diffusés à l'extérieur de l'aérodrome (*Règlement technique* [C.3.1], appendice 3, 4.1.4) est le même que pour les observations synoptiques (moyennes sur 10 mn et direction par rapport au nord géographique⁵) et les valeurs transmises devraient être représentatives de l'ensemble des pistes. Pour les observations de routine et les bulletins spéciaux affichés dans les locaux du contrôle aérien (ATS) (*Règlement technique* [C.3.1], appendice 3,

4.1.3.1), les moyennes sont effectuées sur des périodes de 2 mn aussi bien pour la direction que pour la vitesse du vent et les valeurs doivent être représentatives de la piste utilisée. Bien que la direction du vent doive être mesurée à partir du nord géographique et exprimée en « degrés vrais » (*Règlement Technique* [C.3.1.] 4.6.1 et appendice 3, 4.1.4.1), la pratique courante des personnels ATS est encore de fournir aux aéronefs des directions définies par rapport au nord magnétique (« degrés magnétiques »). Les rafales devraient être déterminées à partir de moyennes glissantes de trois secondes. Il convient de consulter le chapitre 5, partie I et le chapitre 2, partie III du présent Guide quant aux précautions à prendre pour l'échantillonnage des résultats donnés par l'anémomètre afin de mesurer la moyenne, les rafales et la variabilité de la vitesse et de la direction du vent. Il convient d'accorder la préférence aux moyennes vectorielles plutôt qu'aux moyennes scalaires.

Les mesures du vent nécessaires aux aérodromes, telles que la valeur moyenne, les valeurs extrêmes, etc., devraient, de préférence, être déterminées et affichées automatiquement, en particulier lorsque plusieurs capteurs sont utilisés sur différentes pistes. Lorsque plusieurs capteurs sont nécessaires, les indicateurs seront clairement marqués de façon à identifier la piste ou la partie de piste correspondant à chaque capteur.

2.2.2 Instruments et exposition

Les équipements de mesure du vent utilisés aux stations aéronautiques sont généralement du même type que ceux décrits au chapitre 5, partie I. La constante de temps des capteurs utilisés pour la mesure de la direction et de la vitesse du vent devrait répondre aux exigences figurant dans ledit chapitre.

Les capteurs de la direction et de la vitesse du vent devraient être installés à une hauteur voisine de 10 mètres au-dessus du niveau de la piste et devraient donner des valeurs représentatives des conditions qui règnent dans les aires de décollage et de toucher des roues. Cependant, pour la compatibilité avec les observations synoptiques, une hauteur de 10 mètres est préférable.

Si les capteurs du vent installés sur les aérodromes doivent être représentatifs des conditions régnant dans les zones de décollage ou d'atterrissement, il y a lieu

⁵ Habituellement désigné comme le « vrai » nord. L'adjectif « vrai » dans « nord vrai » ne doit pas être confondu avec le « vent vrai » (défini par OMM, 1992). Le « vent vrai » est représenté par le vecteur vent par rapport à la surface de la terre. Pour un objet mobile comme un aéronef, c'est le vecteur somme du vent apparent (i.e. le vecteur vent relatif à l'objet mobile) et de la vitesse de l'objet.

d'éviter toutefois les perturbations ou turbulences dues à la proximité et au passage des avions eux-mêmes (création de fausses rafales lors d'atterrissements ou de décollages). De même, ils ne devront pas être placés trop près de bâtiments, de reliefs, ni dans des lieux sujets à des conditions météorologiques de microclimats (brise de mer, orages fréquents). L'exposition souhaitable pour les équipements de mesure du vent est d'être en terrain découvert, c'est-à-dire dans une zone où la distance entre l'anémomètre et tout obstacle est au moins égale à 10 fois la hauteur de ce dernier.

Il est recommandé de prévoir une réserve ou un équipement de secours en cas de défaillance de l'instrument en service, ceci afin d'éviter toute interruption d'envoi de données vers les services ATS. Lorsque les conditions locales le justifient, il faudrait recourir à l'installation d'un ou plusieurs ensembles de capteurs pour chaque piste concernée. Dans de tels cas, l'utilisation de techniques numériques est recommandée, car elles permettent la transmission de données émises par un grand nombre de capteurs à l'aide d'une ou deux paires de câbles téléphoniques et l'emploi d'indicateurs numériques affichant les valeurs de vent en utilisant des LED de couleurs différentes. Les valeurs « instantanées » de la vitesse et de la direction du vent (avec une constante de distance de 2 à 5 m), la moyenne de la direction et de la vitesse du vent sur 2 ou 10 mn, ainsi que les valeurs extrêmes minimales et maximales de la vitesse sont affichées. Il est parfois possible de sélectionner ces valeurs du vent pour plusieurs points de mesure sur un même indicateur (ce qui restreint le nombre d'indicateurs à installer).

Lors de l'installation des capteurs pour la mesure du vent sur l'aérodrome, une attention toute particulière sera accordée à leur protection contre les décharges atmosphériques orageuses (paratonnerres, mise à la terre du pylône et des câbles blindés ou en fibre optique utilisés). L'équipement électronique de traitement des données sera également protégé.

Afin de maintenir l'exactitude requise, les instruments de mesure du vent seront gardés en bon état de marche et régulièrement vérifiés et recalibrés. Un contrôle en tunnel aérodynamique des performances des capteurs est parfois requis, principalement pour les systèmes analogiques. Le recours aux techniques numériques avec test automatique de certaines fonctions demande moins de surveillance, sans toutefois éliminer les erreurs dues aux frictions. Les composants défectueux et la détérioration de certaines parties des capteurs seront détectés par une surveillance régulière.

Parmi les sources d'erreurs figurent la friction, une mauvaise implantation et des problèmes de trans-

mission ou d'affichage. Des erreurs peuvent être introduites également par la réalisation des capteurs eux-mêmes. Ce type d'erreurs se manifeste surtout dans les cas de vent faible (seuil de rotation trop élevé, inertie trop forte) ou de vent fluctuant (surestimation ou sous-estimation de la vitesse, direction incorrecte en raison d'un amortissement excessif ou insuffisant).

2.3 VISIBILITÉ

La définition de la portée optique météorologique (POM), son estimation ou sa mesure instrumentale sont exposées au chapitre 9, partie I. La mesure du paramètre visibilité en aéronautique constitue une application spécifique de la POM. Toutefois, cette appellation POM n'étant pas encore de pratique courante en aéronautique, le terme visibilité a été conservé dans ce chapitre pour décrire les besoins opérationnels. Pour les besoins de l'aviation il est courant de donner les distances visuelles telles que la portée visuelle de piste (RVR) et la « visibilité à des fins aéronautiques » (VIS-AERO). Il faut noter que cette dernière notion est souvent utilisée dans les bulletins et désignée par le terme « visibilité » tout court, ce qui diffère de la définition courante de la visibilité (voir le chapitre 9, partie I). Certains instruments utilisés pour la mesure de la POM le sont également pour les mesures de la portée visuelle de piste (voir section 2.4) et de la VIS-AERO (voir section 2.3.1). Les exigences formelles relatives à l'aviation internationale figurent dans le *Règlement technique* [C.3.1], appendice 3, 4.2 et 4.3.

Aux aérodromes internationaux, la visibilité mesurée pour figurer dans des comptes-rendus destinés à une diffusion au-delà de l'aérodrome devrait être représentative des conditions régnant sur l'aérodrome et dans son voisinage immédiat. Pour les messages servant aux atterrissages et décollages et diffusés à l'intérieur de l'aérodrome uniquement, les valeurs de la visibilité seront représentatives des zones d'atterrissage et de décollage, en tenant compte du fait que celles-ci peuvent être situées à plusieurs kilomètres de la station d'observation.

Pour les besoins aéronautiques, la gamme des mesures de visibilité va de 25 m à 10 km. Des valeurs supérieures ou égales à 10 km sont notées comme étant de 10 km. Un capteur doit donc être capable de mesurer au delà de 10 km ou d'indiquer si la mesure égale ou dépasse cette valeur. Du point de vue de l'exploitation, il est souhaitable d'atteindre une exactitude de mesure de 50 m jusqu'à 600 m, de 10 pour cent entre 600 et 1500 m et de 20 pour cent au-delà (Supplément A au *Règlement technique* (OMM,

2007). Les indications concernant l'exactitude des mesures figurent aux chapitres 1 et 9, partie I.

Étant donné les minima météorologiques prescrits en vue de déterminer, du point de vue de l'exploitation, si un aéronef peut ou non atterrir ou décoller, il est nécessaire de signaler de manière très précise et très sûre les cas où la visibilité franchit certaines limites. C'est-à-dire chaque fois que la visibilité passe en deçà ou au-delà des valeurs limites de 800, 1500 ou 3000 et 5000 mètres. Ce qui peut être le cas, par exemple, lors de l'apparition, de la disparition ou de l'évolution du brouillard ou des précipitations (*Règlement technique [C.3.1]*, appendice 3, 2.3.2 (e)).

Quand des variations significatives de visibilité existent en fonction des différentes directions, principalement dans le cas où elles affectent les zones d'atterrissement et de décollage, cette information complémentaire devrait être donnée avec indication de la direction des observations, par exemple « VIS 2000 M VERS LE SUD ».

Lorsque la visibilité est inférieure à 800 m, elle devrait être exprimée en multiples de 50 m, par exemple « VIS 350 M ». Lorsqu'elle est égale ou supérieure à 800 m mais inférieure à 5 km, en multiples de 100 m. Lorsqu'elle est égale ou supérieure à 5 km mais inférieure à 10 km, par un nombre entier de kilomètres, par exemple « VIS 7KM ». Et lorsqu'elle est égale ou supérieure à 10 kilomètres, il faudrait indiquer la valeur de 10 kilomètres, sauf lorsque les conditions d'utilisation de CAVOK (Ceiling and Visibility OK) sont applicables (*Règlement technique [C.3.1]*, appendice 3, 4.2.4.1).

Les méthodes décrites dans le chapitre 9, partie I s'appliquent. Les observations de la visibilité météorologique seront faites par un observateur doué d'une vue « normale », observant des repères sélectionnés et de caractéristiques définies, situés à des distances connues de la station météorologique. Ces observations peuvent également être effectuées en utilisant des instruments de mesure de la visibilité tels que transmissomètres et diffusomètres. L'emplacement du site d'observation devrait être choisi de manière à offrir en permanence une vue dégagée sur tout l'aérodrome, y compris sur l'ensemble des pistes.

Lorsque les mesures de la visibilité sont effectuées à l'aide d'un transmissomètre, la base appropriée pour les opérations aéronautiques est de 75 m. Toutefois, si l'instrument est également utilisé pour la mesure de la RVR, il y a lieu de choisir la longueur de la ligne de base la plus adéquate en tenant compte des catégories d'opération en vigueur sur l'aérodrome.

2.3.1

Visibilité à des fins aéronautiques

Le *Règlement Technique [C.3.1.] 1.1* définit la visibilité. La visibilité aéronautique (VIS-AERO) est la plus grande des deux valeurs suivantes :

- (a) la plus grande distance à laquelle on peut voir et reconnaître un objet noir de dimensions appropriées, situé près du sol, lorsqu'il est observé sur un fond lumineux ;
- (b) la plus grande distance à laquelle on peut voir et identifier des feux d'une intensité voisine de 1000 candelas, lorsqu'ils sont observés sur un fond non éclairé.

Cette VIS-AERO est en fait une portée visuelle analogue à la RVR, recouvrant des éléments subjectifs comme la performance virtuelle d'un œil humain et des lumières artificielles. Cependant, le terme « visibilité » est habituellement utilisé sans préciser qu'il s'agit de besoins aéronautiques. Et une confusion est possible avec la définition officielle de la visibilité donnée par l'OMM (voir le chapitre 9, partie I) et qui se rapporte à la POM (portée optique météorologique). La portée optique est une variable objective basée uniquement sur l'état physique de l'atmosphère et non sur des éléments humains ou artificiels. La visibilité (pour des besoins aéronautiques) devrait être fournie dans les messages locaux et les METAR. Bien qu'une station météorologique aéronautique puisse être associée à une station synoptique, la visibilité codée dans les SYNOP sera différente de celle codée dans les METAR, même si elle est mesurée avec le même équipement.

La visibilité pour les besoins aéronautiques peut être mesurée et calculée comme la RVR (voir les détails en section 2.4), exception faite pour l'intensité de la source lumineuse, I, pour laquelle une valeur constante de 1000 cd doit être utilisée. Il faut noter que cette valeur est valable pour les lumières habituellement utilisées pour l'évaluation de la visibilité et qu'elle est 10 fois plus intense que les lumières d'intensité modérée (i.e. 100 cd, voir le chapitre 9, partie I).

2.3.2

Visibilité dominante

La visibilité dominante est la valeur de la visibilité, observée conformément à la définition de la « visibilité pour les besoins aéronautiques », qui est atteinte ou dépassée au moins sur la moitié de l'horizon ou sur la moitié de la surface de l'aérodrome. Cette zone peut comprendre des secteurs contigus ou non contigus. Cette valeur peut être évaluée par observation humaine ou par des systèmes d'instruments. Si des instruments sont installés, ils sont utilisés pour obtenir la meilleure estimation de la visibilité dominante (*Règlement Technique [C.3.1.] 1.1*). La visibilité dominante doit être fournie dans les messages METAR et SPECI.

2.4

PORTEE VISUELLE DE PISTE

2.4.1

Généralités

La portée visuelle de piste (RVR) est définie comme la distance à laquelle un pilote d'avion (placé dans l'axe de la piste) peut voir les marques sur la surface de la piste, ou les feux délimitant la piste ou identifiant la ligne axiale. La RVR est traitée dans le *Règlement technique* [C.3.1] 4.6.3. Des informations détaillées sur la façon d'observer et de noter la RVR sont données dans (ICAO, 2000). Il est recommandé d'effectuer cette mesure durant les périodes au cours desquelles la visibilité horizontale est inférieure à 1500 mètres.

Une hauteur d'environ 5 m est considérée comme la valeur moyenne du niveau des yeux du pilote dans un aéronef placé sur la ligne axiale de la piste. Notons que pour les gros porteurs, la hauteur des yeux du pilote peut atteindre au moins 10 m. En pratique, la portée visuelle de piste ne peut pas être mesurée directement à partir de la position du pilote regardant l'axe de la piste, mais doit être une évaluation de ce qu'il verrait à partir de cette position. Néanmoins, la RVR devrait être évaluée à une hauteur d'environ 2,5 m au dessus de la piste (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.3.1.1).

La RVR doit être transmise aux organes de la circulation aérienne (ATS), chaque fois qu'il y a un changement de RVR en tenant compte de l'échelle en usage. La transmission de tels messages devrait normalement être achevée dans les 15 secondes qui suivent la fin de l'observation. Ces messages d'observation sont donnés en langage clair.

2.4.2

Méthodes d'observation

La portée visuelle de piste peut être mesurée indirectement, soit par des observateurs, avec ou sans l'aide d'équipement supplémentaire, soit au moyen d'un équipement instrumental tel que le transmissomètre, des capteurs mesurant la lumière diffusée ou un système de mesure par vidéo. Aux aérodromes où des approches de précision et en particulier des opérations en catégorie I, II, III A et III B sont effectuées, les mesures de la portée visuelle de piste devraient être faites d'une manière continue et en utilisant des instruments appropriés, comme des transmissomètres ou des diffusomètres à diffusion frontale (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.3.2.1 pour les catégories II et III, et recommandé pour la catégorie I dans l'appendice 3, 4.3.2.2).

La RVR peut être évaluée à des fins opérationnelles en utilisant des tables ou mieux à l'aide d'équipements automatiques donnant un affichage digital

de sa valeur. Elle doit être calculée séparément pour chaque piste conformément au *Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.3.5.

2.4.2.1 **Mesure par des observateurs**

Une méthode simple et commode de détermination de la portée visuelle de piste consiste à faire dénombrer par un observateur les feux de piste visibles dans le brouillard (ou des feux spécialement installés à cet effet parallèlement à la piste). Dans le cas où une approche de précision est utilisée cela ne doit être fait que si les instruments sont défaillants. La difficulté de cette méthode est liée au pouvoir séparateur de l'œil humain qui, à partir d'une certaine distance (dépendant de l'observateur), ne permet plus de différencier et de compter les feux de piste.

Étant donné que la position de l'observateur lorsqu'il examine les feux de piste n'est pas la même que celle du pilote, il est essentiel d'utiliser des courbes de conversion pour déterminer la véritable RVR. Des panneaux spécialement utilisés comme repères et placés le long de la piste peuvent aussi être utilisés pour l'évaluation de la RVR durant la journée.

2.4.2.2 **Mesure par vidéo**

Pour estimer la portée visuelle de piste à l'aide d'un système vidéo, on a recours à une caméra et à un récepteur de télévision permettant d'examiner des repères qui peuvent être soit les feux de piste, soit des lampes spéciales ou des repères disposés le long de la piste. Un tel système est aussi utilisé pour détecter le brouillard en banc ou le brouillard bas, indétectable avec les instruments.

2.4.2.3 **Mesure par transmissomètre**

L'instrument le plus couramment utilisé actuellement pour déterminer la portée visuelle de piste est le transmissomètre. Ce dispositif permet de mesurer le facteur de transmission atmosphérique le long d'un trajet déterminé (voir chapitre 9, partie I). La RVR est déterminée comme suit :

- Évaluation de la RVR quand les feux de piste dominent (RVR basée sur un seuil d'éclairement) : la RVR dépend du facteur de transmission atmosphérique, de l'intensité des feux de piste et du seuil d'éclairement de l'œil de l'observateur (et du pilote), lequel est lui-même fonction de la luminance de fond. Elle peut être calculée à l'aide de la formule :

$$E_t = IR^{-2} T^{R/a} \quad (2.1)$$

où E_t est la valeur du seuil d'éclairement de l'œil de l'observateur (pilote), qui est fonction de la luminance de fond L ; I l'intensité efficace des feux d'axe ou de bord de piste en direction de l'observateur (pilote) ; T le facteur de trans-

- mission, mesuré par le transmissomètre ; R la portée visuelle de piste (RVR) ; a la ligne de base du transmissomètre, qui est le chemin optique parcouru par la lumière. Il faut noter qu'on considère que l'éclairement E de l'observateur (pilote) est donné par $E = I / R^2$. Les exigences en matière de caractéristiques d'intensité lumineuse des feux de piste sont données dans (ICAO, 2004b). En fait, on considère que pour les feux d'axe ou de bord de piste l'éclairement de l'observateur (pilote) est fonction de l'angle de vue de ces feux et qu'en conséquence I dépend de R . On peut donc noter $I = I(R)$ et $E = E(I, R)$. Le calcul de R à partir de l'équation 2.1 n'est donc possible que par itération ; ce qui est relativement facile avec une simple calculatrice équipée pour le calcul mathématique. La valeur de E est déterminée à l'aide d'un capteur de luminance de fond (voir section 2.4.3.3) ;
- (b) Évaluation de la RVR par contraste (basée sur un seuil de contraste) : lorsque l'on utilise des repères autres que des feux pour le guidage des pilotes au cours des atterrissages et des décollages, la portée visuelle de piste devrait être évaluée en se basant sur le contraste entre des repères particuliers et l'arrière plan. Une valeur du seuil de contraste de 0,05 sera utilisée comme base pour les calculs. La formule est la suivante :

$$R = a \frac{\ln 0.05}{\ln T} \quad (2.2)$$

où R est la RVR par contraste. Comme le niveau du seuil de contraste est de 0,05, la RVR par contraste est identique à la portée optique météorologique, soit $R = \text{POM}$. Noter que la RVR basée sur un seuil d'éclairement prévaut toujours sur celle basée sur un seuil de contraste : $\text{RVR} \geq \text{POM}$.

2.4.2.4 Mesures par diffusomètre ou par rétrodiffusomètre

Les instruments mesurant le coefficient de diffusion ou de rétrodiffusion (parfois appelés diffusomètres ou rétrodiffusomètres) sont abordés au chapitre 9, partie I. En vertu des principes régissant la diffusion de la lumière par les aérosols, l'incertitude de la mesure par diffusomètre (angle de diffusion autour de 31-32°) est plus petite que celle de la mesure par rétrodiffusomètre. L'utilisation d'un diffusomètre à diffusion latérale avant est donc préférable. Avec ces instruments le coefficient d'extinction peut être déterminé. C'est le principal paramètre pour le calcul de la RVR. Les expériences et les études menées avec des diffusomètres ont démontré leur capacité à mesurer la RVR pour les applications aéronautiques (WMO, 1990 ; 1992).

L'exactitude obtenue variant d'une conception d'instrument à une autre, les caractéristiques de performance doivent être vérifiées avant de sélectionner un instrument pour l'évaluation de la RVR. L'étalonnage d'un diffusomètre doit être traçable et vérifiable en référence à un transmissomètre standard, dont l'exactitude a été vérifiée sur toute la gamme opérationnelle concernée (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.3.2).

Un diffusomètre détermine, à partir de la lumière diffusée reçue, le coefficient d'extinction σ de l'atmosphère du volume optique (voir chapitre 9, partie I). Comme σ est une mesure directe de la visibilité, R peut être déterminé de façon relativement facile à partir de σ ou de la POM (avec $\text{POM} = -\ln 0,05/\sigma \approx 3/\sigma$). La RVR peut être déterminée comme suit :

- (a) RVR avec feux de pistes dominants (basée sur un seuil d'éclairement) : la RVR sera calculée de la même façon qu'avec un transmissomètre, sauf que l'on utilise σ et non T . Elle peut être calculée par :

$$R = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{I(R)}{E_t \cdot R^2} \right) \quad (2.3)$$

où R est la portée visuelle de piste ; σ le coefficient d'extinction (ou $3/\text{POM}$) ; E_t est le seuil visuel d'éclairement de l'observateur (pilote), qui dépend de la luminance de l'arrière fond ; et I l'intensité effective des feux axiaux ou latéraux en direction de l'observateur (pilote). Comme pour un transmissomètre, R doit être calculé par itération ;

- (b) Évaluation de la RVR par contraste (basée sur un seuil de contraste) : lorsque des marqueurs autres que des feux sont utilisés pour guider les pilotes au cours des atterrissages et des décollages, la RVR doit être basée sur le contraste de cibles spécifiques par rapport à l'arrière fond. Un seuil de contraste de 0,05 doit être utilisé comme base de calcul. La formule est :

$$R = -\ln 0,05 / \sigma = \text{POM} \quad (2.4)$$

Où R est la RVR par contraste. Il faut noter que la RVR basée sur un seuil d'éclairement prévaut toujours sur celle basée sur un seuil de contraste, soit $\text{RVR} \geq \text{POM}$

2.4.3 Instruments et exposition

L'instrumentation pour l'évaluation de la RVR peut être basée sur des transmissomètres ou des diffusomètres. Les observations de la portée visuelle de piste doivent être faites à une distance latérale ne dépassant pas 120 m par rapport à l'axe de la piste. Les sites d'ob-

servation représentatifs doivent être situés, à environ 300 m dans le sens de la piste, à partir du seuil, pour la zone de toucher. Pour les sections médianes et éloignées de la piste, ils seront situés à une distance de 1000 à 1500 m du seuil et à une distance d'environ 300 m de l'autre bout de la piste (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.3.1.2). La position exacte de ces sites et, si nécessaire, d'autres sites supplémentaires (pour les longues pistes), doit être déterminée en prenant en considération les facteurs climatiques, météorologiques et aéronautiques comme les marécages et autres zones sujettes au brouillard. La portée visuelle de piste doit être observée à une hauteur d'environ 2,5 m (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.3.1.1).

Les unités fournissant le trafic aérien et les services d'informations aéronautiques doivent être informés sans délai des changements dans les aptitudes du système d'observation de la RVR.

La RVR en plusieurs points de mesure est calculée par ordinateur et affichée sur écran avec le moment de l'observation, les facteurs de transmission, la luminance mesurée en un ou plusieurs points de l'aérodrome et l'intensité des feux de piste. Les données sont envoyées, pour affichage, au service du trafic aérien (ATS) et aux unités météorologiques et autres unités concernées. Elles peuvent aussi être envoyées à des imprimantes pour enregistrement.

L'intensité des feux de piste doit être entrée automatiquement dans l'ordinateur selon la procédure décrite par le *Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.3.5 ou selon une forme convenue entre les unités ATS et l'unité météorologique locale.

Des enregistreurs (sur une base temporelle) graphiques analogiques ou numériques peuvent aussi être utilisés pour le facteur de transmission T et la luminance de fond L . Un afficheur graphique de la RVR devrait aussi montrer correctement les enregistrements de E_t et I (voir équation 2.1).

2.4.3.1 Transmissomètres

Le chapitre 9, partie I contient une description des transmissomètres, de leur mise en place sur site, de leur entretien et des sources d'erreurs ainsi que des références à d'autres publications.

Le transmissomètre est un système composé d'un projecteur qui dirige un faisceau de lumière d'intensité connue vers un récepteur photoélectrique placé à une distance connue du projecteur. Les variations du facteur de transmission de l'atmosphère dues au brouillard, à la brume, etc., sont mesurées continuellement et enregistrées. L'instrument est calibré de manière à permettre une lecture directe, donnant le facteur de transmission en pourcentage.

Le projecteur et le récepteur doivent être montés à la même hauteur sur des supports rigides, fermes, résistants. Ils doivent être installés de telle façon que l'alignement des deux unités ne soit pas défavorablement affecté par une instabilité du terrain, le gel, le réchauffement différent des pylônes, etc. La hauteur du chemin optique par rapport au niveau de la piste ne devrait pas être inférieure à 2,5 mètres.

Une variante de transmissomètre consiste à placer dans le même boîtier l'émetteur et le récepteur (voir chapitre 9, partie I). Dans ce cas, un réflecteur (par exemple un miroir) est disposé à l'emplacement normal de réception. La lumière parcourt un aller et retour et la longueur de la base est le double de la distance entre l'émetteur/récepteur et le réflecteur. Le transmissomètre peut être à simple base ou à double base, selon qu'un ou deux récepteurs ou rétroréflecteurs, placés à des distances différentes, sont utilisés.

La longueur de la base du transmissomètre, c'est à dire la longueur du chemin optique parcouru par le rayon lumineux entre le projecteur et le récepteur détermine la gamme de mesure de la RVR. Pour une RVR comprise entre 50 et 1500 m, la longueur de base la plus couramment utilisée varie entre 15 et 75 m.

Pour une plus courte longueur de base du transmissomètre, il sera nécessaire que l'exactitude de la mesure du facteur de transmission de l'atmosphère soit plus élevée et que la linéarité du système soit meilleure. Si de faibles valeurs de la RVR doivent être mesurées pour les besoins d'atterrissement en catégories II et III, il y a lieu de choisir un transmissomètre à courte base. Toutefois, le maximum de RVR mesurée est alors relativement peu élevé. Un compromis doit donc être établi. Il existe des transmissomètres à double base, permettant une plus large gamme de mesure par sélection d'une base ou de l'autre, mais lors de la commutation de la ligne de base, il importe de veiller à ce que les valeurs de la RVR restent cohérentes les unes par rapport aux autres.

L'utilisation d'un transmissomètre à base plus longue permet de mesurer des valeurs plus élevées de la RVR, mais il faut alors plus de puissance lumineuse à l'émission pour compenser l'atténuation lumineuse enregistrée entre l'émetteur et le récepteur lors d'un brouillard dense, ainsi qu'un angle de réception plus étroit pour éviter les phénomènes de diffusion parasite. La mesure des signaux les plus faibles dépend également du bruit de fond de l'équipement de mesure.

En général, les axes des transmissomètres sont orientés parallèlement à la piste. Il y a toutefois lieu d'éviter que les rayons solaires directs ne les endom-

magent. Il est donc suggéré de diriger l'axe optique horizontalement dans une direction approximative nord-sud (pour des latitudes inférieures à 50°) ou d'utiliser un système de chicanes.

2.4.3.2 Diffusomètres

Les diffusomètres doivent être installés près de la piste de manière similaire aux transmissomètres. Leur positionnement demande moins de précautions que pour ces derniers. Cependant il faut faire attention à éviter les rayons solaires directs ou diffus qui peuvent influencer (ou endommager) le récepteur. Cela est en particulier le cas pour les rayons diffusés par un couvert neigeux, un lac ou la surface de la mer. Les instruments modernes compensent la contamination des composants optiques.

2.4.3.3 Luminancemètre

Le calcul de la RVR nécessite la connaissance du seuil d'éclairement E_t . Un luminancemètre sera placé à l'extrémité de la piste le long de laquelle un ou plusieurs transmissomètres ou diffusomètres ont été mis en place. Selon le nombre de pistes desservies, un ou plusieurs capteurs peuvent être installés sur l'aéroport.

Le luminancemètre mesure la luminance de l'horizon ou du ciel dans la direction opposée au soleil. Les seuils d'éclairement sont introduits dans le calcul de la RVR soit sous forme continue, soit par paliers (de 2 à 4). La courbe de conversion de la luminance du fond en seuil d'éclairement est donnée dans le *Règlement Technique [C.3.1.]*, supplément E et dans le document ICAO (2000). La relation recommandée pour cette courbe est :

$$\log_{10}E_t = 0,05 (\log_{10}L)^2 + 0,573 (\log_{10}L) - 6,667 \quad (2.5)$$

où L est la luminance du ciel à l'horizon.

Le luminancemètre est constitué d'une photodiode placée au foyer d'une optique d'ouverture d'environ 10° à 20°, dirigée nord-sud (pour éviter les rayons solaires directs) et selon un angle d'élévation de 30° à 45° environ par rapport à la ligne d'horizon.

2.4.4 Contrôle des instruments

Il est essentiel de contrôler périodiquement tous les éléments des systèmes transmissométriques de mesure de la RVR pour s'assurer que l'ensemble fonctionne normalement et est correctement étalonné. En général, les notices fournies par les entreprises qui fabriquent et mettent au point ce type d'équipement donnent les renseignements nécessaires pour effectuer ces contrôles et indiquent les ajustements qu'il convient d'apporter lorsque les performances

nominales de l'appareillage ne sont pas atteintes. Par beau temps, lorsque la visibilité est de plus de 10 à 15 km, il est facile de contrôler que l'équipement indique une transmissivité d'environ 100 pour cent (voir chapitre 9, partie I). Pour les diffusomètres, des disques diffuseurs, émulant certaines valeurs d'extinction, peuvent être utilisés. Cependant, l'étalonnage d'un diffusomètre doit être comparable et vérifiable en référence à un transmissomètre standard (voir la section 2.4.2.4).

Une bonne maintenance et un bon étalonnage sont nécessaires afin :

- (a) d'éviter la salissure des surfaces optiques ;
- (b) de contrôler les variations de l'intensité lumineuse de l'émetteur ;
- (c) d'éviter les dérives après étalonnage ;
- (d) de contrôler l'alignement des émetteurs et récepteurs dans le cas des transmissomètres.

Dans le cas de sites fortement pollués, la maintenance devra être fréquente. Lors des entretiens, il convient d'éviter que tous les équipements soient mis hors service en même temps et que cette interruption de service soit de longue durée, surtout lors d'une période durant laquelle du brouillard est prévu.

Lorsque le brouillard persiste plusieurs jours d'affilée, il faudra vérifier que l'intensité de la lumière émise par le projecteur n'a pas changé et qu'il n'y a aucune dérive de l'équipement. Le contrôle des réglages optiques est difficile, sinon impossible, par brouillard vraiment dense, aussi est-il capital que les instruments soient mécaniquement fiables et que leurs propriétés optiques soient stables.

2.4.5 Affichage des données

Le rafraîchissement de l'affichage des données de la RVR auprès des services concernés est effectué selon les accords locaux en vigueur : toutes les 15 à 60 secondes, parfois même toutes les deux minutes. Les changements de RVR devraient normalement être transmis dans les 15 secondes qui suivent la fin de l'observation.

2.4.6 Exactitude et fiabilité des mesures de la portée visuelle de piste

Lorsque l'on utilise des capteurs de lumière diffuse, par opposition à des transmissomètres, les équations mathématiques de la RVR sont acceptables dans le cas de fines gouttelettes d'eau comme c'est le cas dans le brouillard, mais pas lorsque la visibilité est réduite par d'autres hydrométéores, tels que brouillard givrant, pluie, neige ou lithométéores (tempêtes de sables). Les valeurs mesurées de la POM et de la RVR

doivent alors être prises avec beaucoup de circonspection, étant donné que l'on n'a pas encore établi pour ces cas des relations satisfaisantes qui puissent être adoptées.

Les écarts entre la RVR vue par un pilote et la valeur mesurée peuvent atteindre 15 à 20 pour cent, l'écart type étant supposé ne pas dépasser les 10 pour cent. Dans le cas d'observateurs, les différences entre les seuils d'éclairage et les conditions d'observation, prises ensemble, peuvent provoquer des écarts de 15 à 20 pour cent dans leurs évaluations de la portée visuelle.

Les mesures de la RVR effectuées au moyen de transmissomètres ou d'appareils de mesure du coefficient de diffusion ne sont représentatives que d'un faible volume de l'atmosphère. Étant donné le caractère très fluctuant de la densité du brouillard, aussi bien dans le temps que dans l'espace, une moyenne sur un plus grand nombre d'échantillons ou de mesures est indispensable. Des changements rapides de RVR peuvent entraîner des difficultés pour les services ATS lors de la diffusion des informations aux aéronefs. Pour ces raisons, il est recommandé de prendre une moyenne sur une période de 30 secondes à 1 minute, calculée sous forme d'une moyenne fixe ou d'une moyenne mobile.

La différence entre la RVR mesurée par un observateur ou par un équipement et la valeur réelle de la RVR ne devrait normalement pas dépasser les limites définies dans le supplément A du *Règlement Technique* [C.3.1].

2.5 TEMPS PRÉSENT

L'observation et la détection du temps présent sont traitées au chapitre 14, partie I et les procédures sont définies dans le *Règlement technique* [C.3.1] 4.6.4 et en détail dans l'appendice 3, 3.4.4. Les besoins de l'aviation portent essentiellement sur l'observation et l'indication du début, de la fin, de l'intensité et de la localisation des phénomènes importants pour la sécurité de l'exploitation des aéronefs, par exemple les orages, les pluies givrantes et les éléments réduisant la visibilité en vol.

Pour le décollage et l'atterrissement, les informations concernant le temps présent devraient être représentatives, autant que possible, de la zone de décollage et de montée ou de la zone d'approche et d'atterrissement. Pour les informations diffusées au-delà de l'aérodrome, les observations du temps présent devraient être représentatives de l'aérodrome et de son voisinage immédiat.

La plupart des observations concernant le temps présent sont effectuées visuellement. Les emplacements d'observation devraient être choisis avec soin, de telle façon que l'observateur ait une vue dégagée dans toutes les directions. Des instruments peuvent être utilisés pour appuyer les observations effectuées par l'homme, en particulier pour mesurer l'intensité des précipitations.

Des détecteurs utilisés pour identifier le type de précipitations (pluie, neige, bruine, etc.) ou des phénomènes réduisant la visibilité autres que les précipitations (brouillard, brume, fumée, poussière, etc.) peuvent être envisagés pour assister l'observateur humain ou dans un but d'automatisation. Ils sont essentiellement basés sur la mesure du coefficient d'extinction ou de la scintillation et peuvent également faire appel à des relations entre les phénomènes météorologiques et d'autres grandeurs comme l'humidité. Actuellement, aucun accord international n'existe sur les algorithmes utilisés dans le traitement des données permettant l'identification de ces phénomènes. Le besoin de tels équipements n'est pas indispensable en météorologie aéronautique tant que la présence d'observateurs humains est requise.

Des descriptions des phénomènes repris dans le temps présent figurent dans le chapitre 14, partie I et aussi dans (OMM, 1975 ; 1987 ; 1992 ; 2010) et (ICAO, 2004a).

Des spécifications relatives à l'établissement des messages d'observations spéciales concernant le temps présent figurent dans le *Règlement technique* [C.3.1], appendice 3, 4.4.2. Les abréviations et les chiffres de code utilisés dans les messages en langage clair METAR ou SPECI figurent dans le *Règlement technique* [C.3.1], appendice 3, 4.4.2.3 – 4.4.2.5.

2.6 NUAGES

2.6.1 Généralités

Les observations et la mesure des nuages sont traitées au chapitre 15, partie I. Pour les applications relatives à l'aviation (*Règlement technique* [C.3.1] 4.6.5 et appendice 3, 4.5), les informations concernant les nuages (quantité, hauteur de la base, type) doivent être représentatives de l'aéroport et de ses environs immédiats et des zones d'approche pour les messages destinés à l'atterrissement. Lorsque l'information concernant les nuages est fournie aux aéronefs effectuant des approches de précision, elle sera représentative des conditions régnant dans la zone de la balise intermédiaire du système d'atterrissement

aux instruments. Pour les aérodromes où cette balise n'est pas utilisée, cette information devra concerner la partie de la piste située à une distance de 900 à 1 200 m du seuil d'atterrissage à l'extrémité d'approche de la piste (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.5.1).

Si le ciel est obscurci ou non visible, la hauteur du plafond nuageux est remplacée par la visibilité verticale dans les rapports locaux courants (MET REPORT) ou spéciaux (SPECIAL) (*Règlement Technique* [C.3.1.] 4.5.1(i)) et les rapports météorologiques METAR et SPECI (OMM, 2010). La visibilité verticale est définie comme la distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé sur la même verticale que lui-même, au-dessus ou au-dessous de lui. Elle peut être dérivée du profil d'extinction optique déterminé par un télémètre LIDAR. En supposant que l'extinction totale σ à l'altitude h peut être déduite du coefficient d'extinction de rétrodiffusion σ_b à cette altitude après étalonnage pour toute la gamme d'altitude et en supposant qu'un seuil de contraste de 5 pour cent est applicable comme pour la POM, on peut retenir pour la visibilité verticale VV que :

$$\int_0^{VV} \sigma(h) \cdot dh = \ln \left(\frac{I(VV)}{I_0} \right) = \ln(0.05) = 3 \quad (2.6)$$

Comme les télémètres LIDAR déterminent le coefficient d'extinction local à des intervalles fixes Δh , VV peut être déduite de façon relativement facile de :

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot \Delta h = 3 \quad \text{avec } h_N = VV \quad (2.7)$$

Des mots de code typiques comme CAVOK (conditions de temps favorables), SKC (ciel clair), NCD (pas de nuages détectés) et NSC (pas de nuages significatifs) sont utilisés dans les rapports là où l'état de l'atmosphère ou du temps n'affectera pas les opérations de décollage et d'atterrissage. Il est utile de remplacer l'information quantitative par des acronymes simple. Des précisions sur l'utilisation de cette méthode sont données dans le *Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 2.2 et 4.5.4.1. CAVOK, par exemple, devrait être utilisé lorsque les caractéristiques des nuages et du temps présent sont meilleures que les valeurs ou conditions prescrites. Il faut prendre de grandes précautions dans l'usage de ces abréviations avec les systèmes de mesure automatisés, lesquels ne sont pas capables de mesurer les nuages et la visibilité verticale avec les exigences énoncées.

La hauteur de la base des nuages devrait être normalement donnée par rapport à l'altitude de l'aérodrome. Néanmoins, lorsqu'une piste avec approche

de précision dont le seuil se trouve à 15 m ou davantage au-dessous de l'altitude de l'aérodrome est en service, des dispositions devraient être prises localement afin que l'altitude du seuil serve de niveau de référence pour la hauteur des nuages signalée aux aéronefs en approche.

2.6.2 Méthodes d'observation

Les principales méthodes employées actuellement pour déterminer la hauteur de la base des nuages sont les suivantes :

- (a) projecteurs à faisceau lumineux ;
- (b) télémètres à faisceau rotatif ;
- (c) télémètres à laser ;
- (d) ballons de mesure de la hauteur de la base des nuages ;
- (e) estimation visuelle ;
- (f) comptes rendus d'aéronefs.

La hauteur de la base des nuages devrait être déterminée par des mesures chaque fois que cela est possible. Dans les aérodromes à fort trafic ou internationaux pourvus de systèmes d'approche de précision, les mesures de la base des nuages devraient être effectuées automatiquement afin de disposer d'une manière continue de ces informations et de leur évolution.

La méthode des ballons est trop lente et trop sujette à erreurs pour constituer une méthode valable de la mesure de la hauteur de la base des nuages aux aérodromes. La méthode visuelle est également trop sujette à erreurs, notamment de nuit, pour servir là où les observations sont critiques. Les comptes rendus d'aéronefs sur la hauteur de la base des nuages peuvent fournir à l'observateur des renseignements supplémentaires précieux. Il faut toutefois prendre soin en interprétant les informations des pilotes, de tenir compte du fait que celles-ci peuvent avoir été observées à une distance de plusieurs kilomètres du point d'observation en surface.

2.6.3 Exactitude et fiabilité des mesures de la hauteur de la base des nuages

L'exactitude avec laquelle il est possible de mesurer la hauteur de la base des nuages est limitée par le fait que cette base est fréquemment déchiquetée, diffuse et irrégulière. Des mesures isolées ou peu fréquentes, telles que celles qui sont effectuées à l'aide de ballons de mesure de la hauteur de la base des nuages, ne sont pas nécessairement représentatives des conditions nuageuses d'ensemble. La meilleure estimation consiste à étudier un enregistrement quasi continu sur une période de plusieurs minutes, obtenu au moyen de l'un des instruments cités ci-dessus.

L'exactitude donnée par les fabricants pour les mesures instrumentales est habituellement obtenue en utilisant des cibles solides ou artificielles. Cependant, l'exactitude opérationnelle est plus difficile à obtenir, étant donné le caractère flou de la base des nuages.

2.7

TEMPÉRATURE DE L'AIR

On trouvera au chapitre 2 de la Partie I un exposé général sur les instruments et les méthodes d'observation employés pour mesurer la température de l'air. Pour les besoins aéronautiques (*Règlement technique [C.3.1] 4.1 et 4.5.1(j)]*), il est nécessaire de connaître la température de l'air au-dessus de la piste. Normalement, les données obtenues sous un abri bien situé et convenablement ventilé constituent une approximation suffisante des valeurs requises. Les variations rapides de la température de l'air (2 à 3°C par demi-heure) devraient être communiquées immédiatement aux services ATS, principalement dans les zones tropicales et subtropicales.

Les capteurs thermométriques devraient être exposés de façon à ne pas être soumis à l'influence des aéronefs en mouvement ou en stationnement et devraient fournir des valeurs représentatives des conditions générales qui règnent au-dessus des pistes des aérodromes. Il serait préférable d'utiliser des thermomètres dont la constante de temps est de 20 secondes, ceci afin d'éviter les trop petites fluctuations de température (vent moyen de 5 m s⁻¹). En cas de mesures automatiques, un dispositif numérique approprié calculant des moyennes ou une résistance/capacitance filtrante devraient être utilisés. Les indicateurs ou enregistreurs à distance présentent des avantages. Par ailleurs, pour les aérodromes comportant des pistes dédiées aux opérations d'approche et atterrissages aux instruments de catégories II et III, il est nécessaire d'avoir des instruments automatiques de mesure et des affichages associés. Ces mesures de la température sont de plus en plus intégrées dans les stations ou systèmes d'acquisition de données automatiques, et sont affichées sous une forme numérique. La température affichée devrait représenter une moyenne sur une à 10 minutes, obtenue après linéarisation du signal de sortie des capteurs. Sa valeur est arrondie au degré entier le plus proche pour les usages aéronautiques.

2.8

POINT DE ROSÉE

Aux stations aéronautiques, l'humidité atmosphérique est habituellement exprimée par la température du point de rosée. Sa valeur est arrondie, comme pour la température de l'air, au degré entier le plus

proche. Les procédures sont définies dans le Règlement technique [C.3.1] 4.1 et 4.5.1(j). Les méthodes d'observation sont décrites au chapitre 4, partie I.

Les capteurs modernes d'humidité permettent d'utiliser des indicateurs et des enregistreurs à distance. Le psychromètre est habituellement utilisé pour les observations manuelles. Pour obtenir l'incertitude voulue, un psychromètre ventilé est préférable. Les types d'instruments couramment utilisés sont les suivants :

- (a) les sondes à effet capacitif, basées sur la mesure de capacité d'un condensateur dont la valeur du diélectrique (constitué d'un polymère) varie en fonction de la teneur en vapeur d'eau de l'air ambiant. En pratique la capacitance mesurée est une fonction quasi linéaire de l'humidité relative. Le point de rosée est calculé en utilisant la température ambiante (mesurée séparément et à une très courte distance), $td = td(t, U)$. La formule appropriée est donnée à l'annexe 4.B, chapitre 4, partie I. Pour éviter la condensation, qui peut durer longtemps après que U soit redevenu inférieur à 100% et qui pourrait être piégée par le filtre de protection du capteur, celui-ci devrait être chauffé. Dans un tel cas, la température ambiante ne doit pas être utilisée et l'on utilisera plutôt une valeur de température représentative de l'air chauffé au voisinage du capteur. En pratique, la procédure appropriée ne pourra être déterminée qu'après un minutieux étalonnage dans des chambres climatiques bien conçues ;
- (b) les hygromètres à point de rosée, qui mesurent la température à laquelle un léger dépôt de rosée apparaît sur un miroir. Celui-ci est chauffé ou refroidi, le plus souvent par effet Peltier, afin d'obtenir le point d'équilibre de l'apparition de rosée. Un système photoélectronique de détection de la rosée est associé à ce miroir. Même si ces systèmes fournissent directement la température du point de rosée, la pollution et la détérioration du miroir peuvent introduire des biais significatifs. Le gel, en particulier, est susceptible de détruire le miroir. Celui-ci devra être inspecté tous les six mois au moins, mais seulement par un personnel qualifié. De grandes précautions devront être prises pour le nettoyage du miroir et les instructions du constructeur doivent être suivis précisément.

2.9

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

2.9.1

Généralités

Le chapitre 3, partie I présente un exposé général sur les observations de la pression atmosphérique ; pour

ce qui concerne plus spécialement l'aviation, il faut se référer au *Règlement technique* [C.3.1] 4.6.7. Les valeurs de la pression destinées au calage des altimètres de bord sont essentielles aux stations aéronautiques. Ces valeurs sont mesurées en dixièmes d'hectopascals (hPa) et désignées dans le code Q par les abréviations QFE et QNH qui ont les significations suivantes :

- (a) le QFE (pression au niveau du terrain) est défini comme la pression à une altitude correspondant à l'altitude officielle de l'aérodrome (*Règlement Technique* [C.3.1.], Appendice 3, 4.7.2). L'altitude du point de référence de l'aérodrome et l'altitude de la piste sont décrites dans (ICAO, 2004b) ;
- (b) le QNH (pression atmosphérique à la hauteur de navigation) est défini comme la pression sur laquelle un altimètre de bord doit être calé pour qu'il indique l'altitude officielle de l'aérodrome lorsque l'avion est au sol. La valeur du QNH est calculée en utilisant la valeur QFE et la relation altitude-pression de l'atmosphère standard OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). En fait cette dernière est une sous gamme de l'atmosphère standard internationale qui est définie par la norme ISO 2533:1975 et est développée en liaison avec le Comité de la Recherche Spatiale, l'OACI et l'OMM. Cette atmosphère standard est une atmosphère statique avec une pression et une température fixées au niveau de la mer et un gradient donné de température. Des détails en sont donnés avec les constantes pré-définies dans (WMO, 1966) et (ICAO, 1993).

Pour le calcul de QNH à partir de QFE, c'est-à-dire la réduction au niveau de la mer, c'est cette atmosphère virtuelle qui est utilisée et non pas le véritable état courant de l'atmosphère. Il en résulte que le QNH sera différent de la pression atmosphérique réduite au niveau de la mer décrite à la section 3.11, chapitre 3, partie I pour laquelle la véritable température est utilisée. Le calcul de QNH à partir de QFE est basé sur une règle de calcul (pour les stations au-dessous de 3000 à 4000 m environ) :

$$\text{QNH} = A + B \cdot \text{QFE} \quad (2.8)$$

où A et B dépendent de l'altitude géopotentielle de la station (pour plus de détails voir (WMO, 1966), introduction à la table 3.10). QNH sera obtenu en suivant les trois étapes suivantes :

- déterminer l'altitude barométrique de la station à partir du QFE (en utilisant la formule de l'atmosphère standard) ;
- soustraire (ou ajouter pour les station sous le niveau de la mer) de cette altitude barométrique, l'altitude de la station (par rapport au niveau de la mer) pour obtenir l'altitude barométrique au niveau de la mer (qui peut être positive ou négative) ;
- déduire de cette altitude barométrique la valeur associée de la pression (en accord avec l'atmosphère standard) qui sera le QNH.

Un exemple de cette procédure est donné dans la figure 2.1.

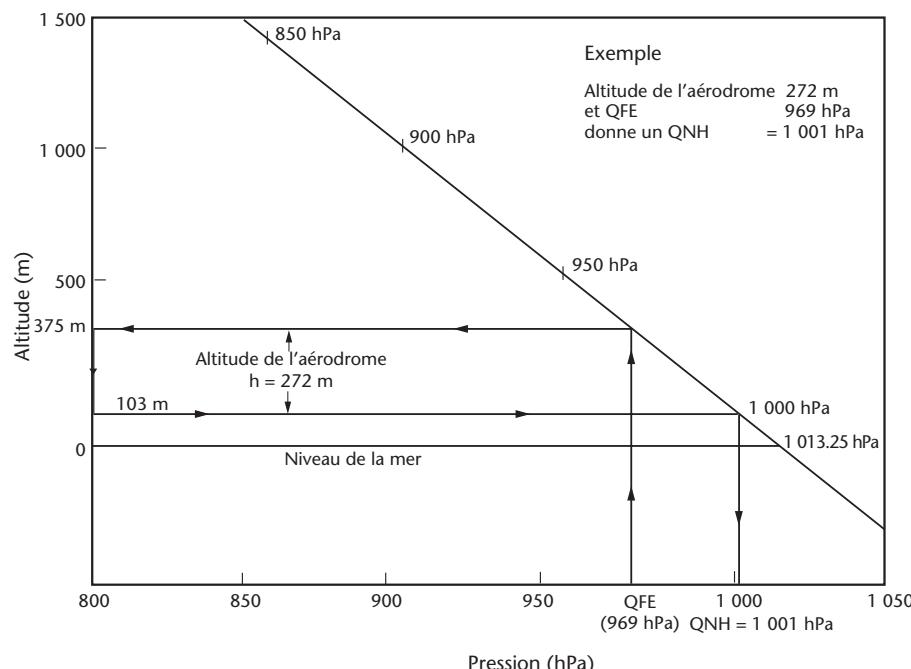


Figure 2.1. Relation entre le QFE et le QNH

Les valeurs de la pression mesurée, de QNH et/ou de QFE doivent être calculées en dixièmes d'hectopascal. Dans les rapports locaux et ceux qui sont diffusés autour de l'aérodrome, les valeurs de QNH et QFE doivent être incluses et arrondies à l'hectopascal inférieur le plus proche. Les unités ATS doivent être averties des changements rapides de la pression.

La courbe (figure 2.1) représente l'atmosphère standard (altitude barométrique en fonction de la pression).

2.9.2 Instruments et exposition

L'équipement instrumental utilisé à une station aéronautique pour mesurer la pression est identique à celui d'une station synoptique, excepté qu'un plus grand usage est souvent fait de baromètres digitaux automatiques de précision pour des raisons de convenance et de vitesse de lecture pour les observations courantes. Les stations aéronautiques devraient, toutefois, être équipées d'un baromètre (ou plus) bien étalonné, comparable avec une référence standard. Ces instruments devraient être périodiquement comparés à un étalon approprié, suivant un programme établi. Aussi bien les baromètres automatiques que manuels conviennent à condition que la dépendance à la température, la dérive et l'hystérésis soient suffisamment compensées. Des détails sont donnés sur les baromètres appropriés dans le chapitre 3, partie I.

Les conditions prescrites pour l'exposition des baromètres dans les stations synoptiques s'appliquent aux stations aéronautiques. Si les baromètres doivent être installés à l'intérieur d'un bâtiment, le capteur devrait être relié à l'air extérieur en utilisant une prise d'air statique appropriée. Compte tenu de l'impact du vent sur le bâtiment, les différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur peuvent dépasser 1 hPa. Pour éviter ce biais, qui peut aller jusqu'à 3 hPa environ, en plus ou en moins, pour de grandes vitesses de vent, la prise d'air doit être placée suffisamment loin du bâtiment. De même, l'air conditionné peut avoir un impact sur les mesures de pression, ce qui peut être évité par l'utilisation d'une telle prise d'air.

Des instruments affichant directement la valeur du QNH sont disponibles et peuvent remplacer avantageusement les baromètres anéroïdes normaux ou les baromètres à mercure, qui nécessitent l'utilisation de tables de conversion pour obtenir le QNH. Pour ces appareils, les valeurs correctes de A et B, qui sont fonction de l'altitude géopotentielle de la station (voir équation 2.8) doivent être entrées. Les valeurs mesurées par ces instruments doivent être

périodiquement comparées avec les valeurs du QNH calculées à partir des mesures obtenues à l'aide du baromètre à mercure.

2.9.3 Exactitude et correction des mesures de pression

Les valeurs de la pression destinées au calage des altimètres de bord devraient être données avec une exactitude d'au moins 0,5 hPa (*Règlement Technique [C.3.1.]*, supplément A). Toutes les corrections appropriées devraient être appliquées aux lectures du baromètre à mercure ; de plus, il y a lieu d'appliquer aux baromètres anéroïdes utilisés pour les observations de routine les corrections établies suite aux comparaisons régulières entre ces derniers et un baromètre à mercure. Lorsque des altimètres anéroïdes sont utilisés dans les tours de contrôle d'aérodrome, il est nécessaire d'appliquer des corrections différentes de celles qui sont appliquées à la station d'observation, afin de réduire d'une manière appropriée la pression au niveau officiel de l'aérodrome ou de la piste (*Règlement technique [C.3.1]*, appendice 3, 4.7).

Pour déterminer les valeurs de la pression destinées aux procédures de calage altimétrique, l'altitude officielle de l'aérodrome devrait être prise comme niveau de référence. Pour les pistes sans approche de précision dont le seuil est situé à deux mètres ou davantage au-dessous de l'altitude de l'aérodrome, et pour les pistes avec approche de précision, le QFE, s'il est fourni, devrait être donné par rapport à l'altitude du seuil en question.

2.10 AUTRES RENSEIGNEMENTS IMPORTANTS AUX AÉRODROMES

2.10.1 Généralités

Les observations faites aux stations aéronautiques devraient également comprendre tout renseignement disponible sur les conditions météorologiques dans les aires d'approche et de montée après le décollage. Cela comprend tout ce qui se rapporte aux phénomènes suivants et à leur localisation : cumulonimbus ou orages, turbulence modérée ou forte, cisaillement horizontal et/ou vertical du vent et variations significatives du vent le long de la trajectoire de vol, grêle, lignes de grains actives, givrage modéré ou fort, précipitation givrante, ondes orographiques marquées, tempête de sable, tempête de poussière, rafales de neige, entonnoir nuageux (tornade ou trombe). Par exemple on stipulera : VENT DE SURFACE 320/10, VENT À 60 M 360/25 DANS APCH ou TURB MOD ET GIVRAGE DANS LA MONTEE APRÈS DÉCOLLAGE.

2.10.2 Portée visuelle oblique

Malgré les études entreprises dans différents pays, aucun instrument réellement opérationnel de mesure de la portée visuelle oblique n'a été mis au point. L'évolution technologique rapide des systèmes d'atterrissement par tout temps a permis de baisser les minima imposés pour les atterrissages aux aérodromes (Catégories II, III A et III B) et a conduit graduellement à accorder moins d'importance à ce paramètre. Aucune recommandation n'a été élaborée pour sa mesure.

2.10.3 Cisaillement du vent

Le cisaillement du vent est un changement de vitesse et/ou de direction du vent dans l'espace (courants ascendants et descendants compris). L'intensité du cisaillement du vent peut être classée comme faible, modérée, forte ou violente suivant son influence sur les aéronefs. Le cisaillement du vent dans les basses couches, susceptible d'affecter les opérations d'atterrissement et de décollage, peut se présenter comme un gradient vertical de vent dans les couches inférieures d'une atmosphère thermiquement stable ou être dû à l'influence d'obstacles et de surfaces frontales sur l'écoulement du vent, à l'effet des brises de terre et de mer, ainsi qu'au régime du vent au sein et autour des nuages de convection, surtout quand ils sont orageux. Les orages violents sont de loin la cause la plus importante du cisaillement du vent dans les basses couches et une cause d'accidents fatals pour les aéronefs, tant en approche et à l'atterrissement qu'au décollage.

La rédaction et la diffusion des avertissements de cisaillement du vent sur les trajectoires de montée et d'approche sont traitées dans le *Règlement Technique* [C.3.1], appendice 3, 4.8.1.3.

La mesure du cisaillement vertical du vent est décrite au chapitre 5, partie I. Elle peut être effectuée directement au moyen d'anémomètres fixés sur des mâts élevés et devant être placés à une certaine distance de l'aérodrome. Parmi les systèmes de télédétection existants, citons le radar Doppler, le Lidar, le Sodar et le radar profiteur de vent. Le Lidar utilise une lumière laser, le Sodar une onde acoustique et le radar profiteur de vent une impulsion sous forme d'onde magnétique de fréquence proche soit de 50 MHz, soit de 400 MHz, soit de 1000 MHz.

Le cisaillement horizontal du vent est généralement mis en évidence par un réseau d'anémomètres répartis sur tout l'aérodrome. Ce système est appelé Low Level Wind Shear Alert System ou Système d'alerte de cisaillement du vent dans les basses couches. À l'aide d'algorithmes traités par ordinateur, une

alarme avertissant du cisaillement du vent peut être transmise. Ce système est plus particulièrement utilisé dans les régions tropicales et subtropicales où se produisent de fréquents et intenses développements orageux.

Le sujet est traité dans son ensemble dans le document OACI, *Manual on Low-level Wind Shear and Turbulence* (Doc. 9817), 2005.

Bien que le cisaillement du vent ait un impact significatif sur les opérations aériennes, aucune recommandation ou critère n'ont été établis jusqu'à présent. Néanmoins, des indications sur les alertes concernant le cisaillement du vent sont données dans (ICAO, 2004a).

2.10.4 Inversions marquées de température

Les informations concernant des inversions de température de plus de 10°C entre la surface et des niveaux jusqu'à 300 m devraient être fournies si elles sont disponibles. Ces données sont généralement obtenues à l'aide de radiosondes sur ballon, de dispositifs de télédétection, des données transmises par les aéronefs (AMDAR (OMM, 2003) par exemple) ou par une estimation météorologique.

2.11 SYSTÈMES D'OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES AUTOMATIQUES

Des systèmes instrumentaux spécialement conçus sont également utilisés aux stations aéronautiques pour mesurer, traiter, transmettre à distance et enregistrer les valeurs des différents paramètres météorologiques représentatifs des conditions régnant dans les aires d'approche, d'atterrissement et de décollage, ainsi que des conditions générales régnant sur les pistes de l'aéroport (*Règlement technique* [C.3.1] 4.1).

Ces stations automatiques sont composées :

- d'une station d'acquisition permettant la conversion du paramètre analogique électrique mesuré (V, mA, résistance, capacité) en valeurs numériques dans les unités appropriées, ainsi que l'introduction directe de données numériques ;
- d'une unité de prétraitement (moyenne des valeurs mesurées sur des intervalles de temps de 1 à 10 minutes, selon le paramètre mesuré, valeurs minimales, maximales et moyennes des différents paramètres) ;
- d'un calculateur servant, par exemple, à préparer la rédaction des messages SYNOP, METAR et SPECI, ainsi que du logiciel de télécommunication.

L'observateur devra pouvoir introduire dans ces messages des paramètres qui ne sont pas mesurés par la station automatique, tels que temps présent, temps passé, nuages (type et quantité) et parfois la visibilité. Pour l'aéronautique, ces stations ne sont donc souvent qu'une aide à l'acquisition des données météorologiques et ne peuvent fonctionner sans la présence d'observateurs.

Les instruments de la station automatique devraient être vérifiés et inspectés régulièrement. Des contrôles de qualité sont nécessaires et recommandés si l'on veut éviter des erreurs grossières et des dérives d'équipements. Les mesures effectuées par les stations météorologiques automatiques sont traitées en détail au chapitre 1, partie II. L'assurance qualité et les autres problèmes de gestion sont traités au chapitre 1, partie III. Pour garantir la performance attendue des instruments automatiques, un plan d'évaluation détaillé doit être établi en détaillant la périodicité de la maintenance et de l'étalonnage et avec des procédures de retour d'expérience pour améliorer le système d'observation.

Des recommandations pour la communication des informations météorologiques à partir des systèmes d'observation automatique sont données dans le *Règlement Technique [C.3.1.]*, appendice 3, 4.9.

2.12 RADAR

Aux aérodromes à fort trafic, le radar météorologique est devenu indispensable, car il assure une protection efficace, permanente et en temps réel en fournissant des observations complémentaires aux observations météorologiques usuelles pour les atterrissages et les décollages. Le radar permet de donner des informations sur une zone plus large pouvant s'étendre jusqu'à 150 à 200 km. Il constitue aussi une aide à la prévision à brève échéance, dans l'heure ou les quelques heures qui suivent l'observation (aide possible pour la rédaction du message TREND).

L'interprétation des échos reçus renseigne sur le type de précipitations autour de la station : précipitations provenant de nuages de type stratifié ou convectif, précipitations à caractère isolé ou en ligne, ou encore associées à des orages et, sous certaines conditions, détection des précipitations sous forme de neige ou de grêle. L'image reçue permet de suivre les trajectoires de lignes de grains ou de fronts et leur évolution (intensification ou décroissance). Si le radar est équipé d'un dispositif Doppler, on peut en déduire la vitesse et le sens de déplacement de ces échos.

Les radars les plus répandus utilisent les longueurs d'onde de 3, 5 ou 10 cm. Le choix dépend de la région du globe et du but recherché, mais la tendance générale actuelle est d'utiliser la longueur d'onde de 5 cm.

Dans certaines régions, des centres centralisateurs recueillent les images radar reçues par une série de stations radar réparties sur le pays ou sur une région et les assemblent en mosaïque (image composite). Des échanges d'images ont également lieu entre ces différents centres de manière à couvrir d'une protection radar la zone la plus large possible.

On trouvera au chapitre 9, partie II un exposé général sur les observations radar.

2.13 DÉTECTEUR DE VERGLAS

Ce type d'instrument, décrit au chapitre 14, partie I, est installé sur nombre d'aérodromes afin de renseigner sur l'état des pistes en hiver. La température en surface, celle à quelques centimètres sous la piste, la présence de neige, d'eau, de verglas ou de givre blanc, la présence ou non de sels ou de produits dégivrants sont mesurées ou détectées. Ces capteurs, réalisés sous forme d'une unité compacte, sont placés en un certain nombre de points sur les pistes ou les voies de circulation; leur nombre dépend de l'importance de l'aérodrome et du nombre de pistes que l'on désire protéger. Des capteurs atmosphériques sont également placés près des pistes (mesure de la température et de l'humidité de l'air, du vent, des précipitations).

Un système d'acquisition et de traitement des données permet l'affichage des paramètres mesurés et de leur évolution dans le temps. Selon le type de logiciel utilisé, des systèmes d'alarme de présence de verglas ou de prévision de conditions dangereuses pour l'aviation attirent l'attention de l'autorité aéroportuaire responsable de la gestion de l'aérodrome.

2.14 DÉTECTION DES ÉCLAIRS

Des dispositifs basés sur la détection des ondes électromagnétiques de basse fréquence accompagnant les éclairs ont été développés ces dernières années (chapitre 7, partie II). Ces systèmes mesurent le temps d'arrivée de l'onde sonore et/ou la direction de son émission. Certains systèmes analysent également les caractéristiques de chaque impulsion radio pour identifier les décharges

nuage-sol. Dans certaines régions, des dispositifs de ce type sont installés pour mesurer et localiser ces phénomènes dans une zone de 50 à 100 km autour de l'aérodrome.

2.15 AUTRES OBSERVATIONS PERTINENTES

Des informations complémentaires doivent être fournies si l'atmosphère est dangereusement polluée, par exemple durant les éruptions volcaniques. Des informations doivent aussi être fournies en soutien aux opérations de secours, spécialement aux stations offshore. Si elles sont pertinentes pour les opérations de décollage et d'atterrissement des aéronefs, les informations sur l'état de la piste doivent être fournies,

par les autorités compétentes de l'aéroport, dans les messages METAR et SPECI.

Les cendres volcaniques doivent être signalées (dans les rapports SIGMET) comme une partie des informations supplémentaires (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.8). Des détails sur l'observation des cendres volcaniques, des matériaux radioactifs et des nuages chimiquement toxiques sont donnés dans (ICAO, 2001 ; 2004c).

Des informations, dans les messages METAR et SPECI, sur la température de surface de la mer et son état doivent être fournies à partir des stations météorologiques établies sur des structures offshore pour le soutien des opérations héliportées (*Règlement Technique* [C.3.1.], appendice 3, 4.8.1.4).

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Committee on Low-Altitude Wind Shear and its Hazard to Aviation, 1983 : *Low-Altitude Wind Shear and Hazard to Aviation*. National Academy Press, Washington DC (<http://www.nap.edu/books/0309034329/html/>).
- International Civil Aviation Organization, 1993 : *Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres)*. Third edition, Doc. 7488, Montreal.
- International Civil Aviation Organization, 1996 : *Manual on the Provision of Meteorological Service for International Helicopter Operations*. Doc. 9680, Montreal.
- International Civil Aviation Organization, 2000 : *Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices*. Second edition, Doc. 9328, Montreal.
- International Civil Aviation Organization, 2001 : *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds*. Doc. 9691, Montreal.
- International Civil Aviation Organization, 2004a : *Manual of Aeronautical Meteorological Practice*. Chapter 2 and Appendix D. Sixth edition, Doc. 8896, Montreal.
- International Civil Aviation Organization, 2004b : *Aerodromes*. ICAO Annex 14, Volume I, Montreal.
- International Civil Aviation Organization, 2004c : *Handbook on the International Airways Volcano Watch (IAVW)*. Second edition, Doc. 9766, Montreal.
- Organisation météorologique mondiale, 1975 : *Atlas international des nuages. Volume II – Manuel de l'observation des nuages et des autres météores*. OMM n°407, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1987 : *Atlas international des nuages*. Volume I – (photographies). OMM n°407, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990 : *Guide des pratiques des centres météorologiques desservant l'aviation*. OMM n°732, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Vocabulaire météorologique international*. OMM n°182, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2002 : *Directives pour la formation professionnelle des personnels de la météorologie et de l'hydrologie opérationnelle*. OMM-N° 258, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel de référence AMDAR – Retransmission des données météorologiques d'aéronefs*. OMM-N° 958, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2006 : *Guide des Systèmes d'observation et de diffusion de l'information pour l'assistance météorologique à la navigation aérienne*, OMM-N° 731, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2007 : Règlement technique. Volume II, Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale, OMM-N° 49, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2010 : *Manuel des Codes – Codes internationaux*. Volume I.1, OMM-n°. 306, Genève.
- World Meteorological Organization, 1966 : *International Meteorological Tables* (S. Letestu). (with 1973 amendments), WMO-No. 188, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1990 : *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report* (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldridge, W. R. Sparks). Instruments and Observing Methods Report No. 41, WMO/TD-No. 401, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1992 : Visibility measuring instruments : Differences between scatterometers and transmissometers (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92)*. Instruments and Observing Methods Report No. 49, WMO/TD-No. 462, Geneva.

CHAPITRE 3

OBSERVATIONS D'AÉRONEFS

3.1 GÉNÉRALITÉS

3.1.1 Définitions

Le présent chapitre décrit les méthodes utilisées pour les mesures météorologiques automatiques à partir d'aéronefs commerciaux modernes, dans les systèmes connus collectivement sous le nom d'AMDAR (retransmission des données météorologiques d'aéronefs). Les principes décrits ici peuvent être utilisés pour le traitement des données à bord de tout avion instrumenté. Pour plus ample information, il convient de se reporter au Manuel de référence AMDAR – Retransmission des données météorologiques d'aéronefs (OMM-N°95).

Des aéronefs météorologiques automatiques (sans pilote) à long rayon d'action, comme l'aérosonde (Holland, McGeer et Youngren, 1992) ont été mis au point. N'étant pas susceptibles d'être déployés en grand nombre, nous ne les décrirons pas ici.

Des systèmes de retransmission des données météorologiques d'aéronefs fonctionnent à bord d'aéronefs équipés de systèmes de navigation et autres systèmes de télédétection perfectionnés. Ce sont des capteurs qui mesurent la vitesse et la température de l'air, ainsi que la pression atmosphérique. L'équipement de radionavigation de l'aéronef fournit d'autres données relatives à la position, l'accélération et la direction de vol de l'aéronef. Ce dernier comporte aussi des calculateurs de bord pour la gestion de vol et les équipements de radionavigation qui calculent en permanence les données de navigation et les données météorologiques à la disposition de l'équipage dans le poste de pilotage. Dans les systèmes AMDAR, elles sont traitées plus avant et entrées automatiquement dans le système de communication de l'aéronef pour transmission au sol, ou encore on peut utiliser un ensemble de traitement spécifique embarqué pour accéder aux données brutes des systèmes de l'aéronef et en dériver des variables météorologiques de manière indépendantes.

Dans les systèmes AMDAR, on utilise ces installations pour compiler et transmettre des messages d'observations météorologiques en temps réel. Normalement, ces messages contiennent la vitesse et la direction du vent (dans le plan horizontal), la tem-

pérature de l'air, l'altitude (par rapport à un niveau de pression de référence), une mesure de la turbulence, l'heure d'observation, la phase de vol et la position de l'aéronef.

Les données de base pour les observations météorologiques doivent faire l'objet de corrections importantes et d'un traitement complexe pour produire des mesures météorologiques représentatives de l'écoulement libre au voisinage de l'aéronef. Une description complète de tous les procédés intervenant dépasse la portée du présent Guide, mais une description relativement détaillée des principes figure en annexe, ainsi que quelques ouvrages de référence pour en savoir plus.

3.1.2 Capteurs météorologiques d'aéronefs

Les capteurs de base embarqués sur les aéronefs commerciaux modernes comprennent la sonde anémométrique et la sonde de température totale (TAT). Les données transmises par ces capteurs, ainsi que les informations transmises par le système de navigation de l'aéronef, généralement fournies par un seul ou une combinaison de systèmes faisant appel aux aides à la radionavigation (NAVAID) (Système de positionnement global – GPS), le dispositif de mesure de distance, le radiophare omnidirectionnel VHF (VOR), le système d'atterrissement aux instruments, et dans certains cas le système de navigation par inertie, sont traitées pour donner les éléments météorologiques suivants :

- a) L'altitude-pression, la position et l'heure ;
- b) La température de l'air statique ;
- c) La vitesse du vent ;
- d) la direction du vent.

Sur certains appareils, il est possible de prévoir un traitement supplémentaire pour mesurer la turbulence ou d'ajouter des capteurs destinés à mesurer la formation de givre sur les surfaces de vol, et/ou l'humidité relative ou encore le rapport de mélange de la vapeur d'eau.

Afin de mieux cerner la complexité du système de traitement, la description présentée ci-après suit le schéma fonctionnel d'un système opérationnel type. On notera (figure 3.1) que les variables calculées sont fortement liées.

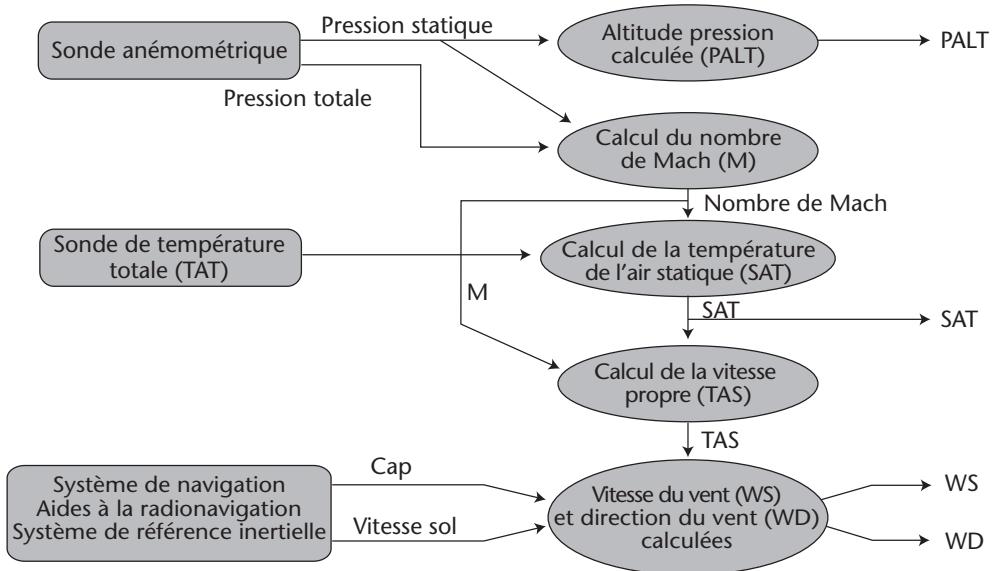


Figure 3.1. Traitement des données émanant des capteurs AMDAR

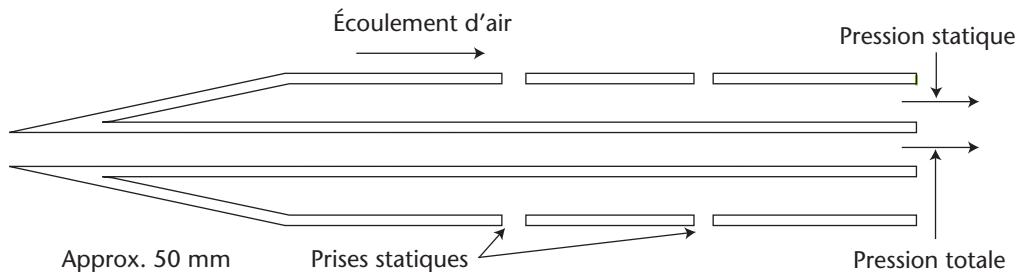


Figure 3.2. Sonde anémométrique

3.2 PRESSION ET NOMBRE DE MACH

3.2.1 Sonde anémométrique

La sonde anémométrique (figure 3.2) est exposée au courant d'air au-delà de la couche limite de l'aéronef et mesure la pression statique (c'est-à-dire la pression du courant d'air) et la pression totale (pression statique, pression d'impact ou pression dynamique). Les signaux de sortie des capteurs sont transmis au calculateur de données aérodynamiques via un baromètre électronique, lequel calcule l'altitude-pression et le nombre de Mach à partir de ces deux mesures.

3.2.2 Altitude-pression

En principe, la mesure de la pression statique n'est pas indiquée selon le code AMDAR, mais

elle est convertie par la centrale aérodynamique en altitude équivalente suivant l'Atmosphère type internationale (OACI, 1964). Pour déterminer l'atmosphère type (figure 3.3), on suppose une diminution linéaire de la température en fonction de l'altitude de $6,5^{\circ}\text{C}$ par kilomètre jusqu'à 11 km (36 089 pieds), une température de 15°C et une pression au niveau de la mer de 1 013,5 hPa au niveau moyen de la mer. De 11 à 20 km, on suppose une température constante de $-56,5^{\circ}\text{C}$.

Pour l'altitude-pression (PALT) inférieure ou égale à 36 089 pieds, la pression statique (P) est liée à PALT selon l'expression suivante :

$$P \text{ (hPa)} = 1\,013,25 \cdot (1 - 10^{-6} \cdot 6,8756 \cdot (\text{PALT}))^{5,2559} \quad (3.1)$$

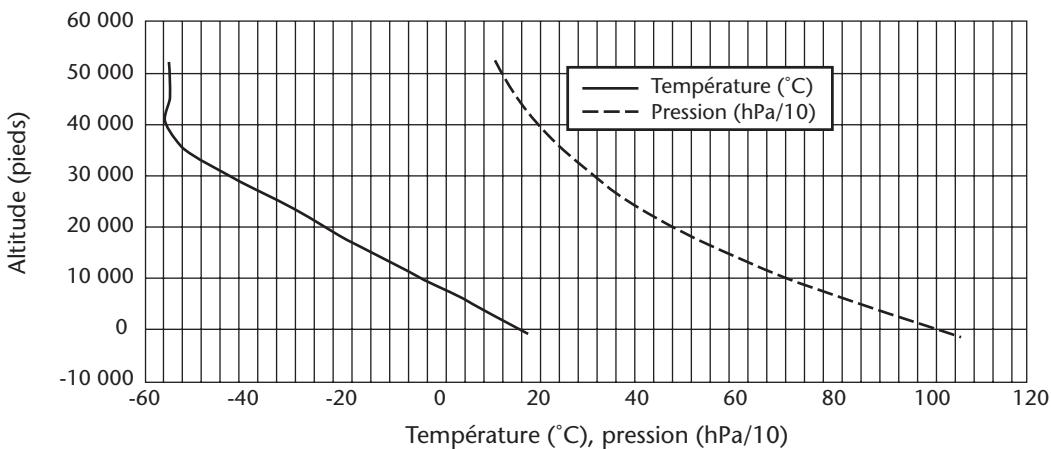


Figure 3.3. Atmosphère type internationale OACI

Par exemple, si l'altitude pression est égale à 30 000 pieds, $P = 300,9 \text{ hPa}$.

On peut utiliser directement l'expression ci-dessus si l'échelle de pression (référence zéro) de l'altimètre de l'appareil est calée sur la pression de référence (1 013,25 hPa), auquel cas l'altitude-pression est identique à l'altitude indiquée. Les procédures de navigation indiquent aussi les calages de l'échelle de pression pour d'autres niveaux de référence. Par exemple, cette dernière peut être calée sur la pression au niveau de l'aérodrome (QFE) ou la pression atmosphérique au niveau de la mer (QNH), pression de référence de l'échelle de l'atmosphère type, de façon à ce que l'altitude de l'aérodrome soit indiquée lors de l'atterrissement sur un terrain donné. Ainsi, en général, l'altitude-pression est égale à l'altitude indiquée plus l'altitude correspondante à l'échelle de pression de référence de l'altimètre à l'échelle de l'atmosphère type. L'expression générale s'écrit :

$$\text{PALT (ft)} = H_i + H_r \quad (3.2)$$

$$H_r = (1 - (P_r / 1\,013,5)^{0,1903}) 10^6 / 6,8756 \quad (3.3)$$

Où H_i désigne l'altitude indiquée; H_r l'altitude correspondant à la pression de référence, et P_r (hPa) désigne le calage de l'échelle de l'altimètre (on notera que $H_r = 0$ si $P_r = 1\,013,25$ hPa).

Par exemple :

- a) Si l'échelle de pression est calée sur une valeur QNH de 1 000,0 hPa et que l'altitude indiquée est de 9 335 pieds, $\text{PALT} = 9\,335 + 364 = 9\,699$ pieds et $P = 705$ hPa ;
- b) Si l'échelle de pression est calée sur une valeur QFE de 990 hPa, que l'aérodrome se situe à une

altitude de 276 pieds et que l'altitude indiquée est de 9 058 pieds, $\text{PALT} = 9\,058 + 641 = 9\,699$ pieds et la valeur de QNH sera alors de 1 000 hPa.

Si l'altitude-pression est supérieure à 36 089 pieds, la pression statique est donnée par :

$$P (\text{hPa}) = 226,32 \cdot (36\,089 / 20\,805)^{-0,1903} \quad (3.4)$$

Par exemple, si l'altitude-pression est égale à 40 000 pieds, $P = 187,5$ hPa.

3.2.2.1 Incertitude des mesures

Les sources d'erreur possibles sont les suivantes :

- a) Erreur d'étalonnage ;
- b) Erreur aléatoire de courte durée liée à un instrument ;
- c) Déplacement du zéro ;
- d) Erreur d'exposition ou erreur d'antenne statique.

Comme la distance de sécurité entre appareils est primordiale, ces erreurs sont autant que possible corrigées dans la centrale aérodynamique. Les erreurs d'antenne statique, qui sont fonction de l'emplacement de l'antenne, du nombre de Mach et de l'incidence, sont déterminées empiriquement lors des essais en vol. L'incertitude de la pression est déduite des altitudes signalées.

Les altitudes AMDAR, telles que chiffrées dans le *Manuel des codes* (OMM-N° 306), sont indiquées en centaines de pieds, 100 pieds équivalant à 1,5 hPa environ à l'altitude de croisière. Cela représente à peu près 0,1 % de la mesure de la pression à grande échelle. L'exactitude des instruments étant dans le meilleur des cas de l'ordre 0,05 %, l'incertitude de la pression statique à l'altitude de croisière, déduite de

la conversion de l'altitude-pression, est à peu près de 2 hPa. Au niveau de référence zéro, la résolution équivaut environ à 3,5 hPa, ce qui donne une incertitude d'environ 4,0 hPa.

3.2.3 Nombre de Mach

Le nombre de Mach (M , vitesse propre divisée par la vitesse du son en air libre) est un élément important des opérations aériennes. Dans les systèmes AMDAR, il est utilisé pour corriger les mesures de la température de l'air et de la vitesse propre. En air sec, la vitesse du son est proportionnelle à la racine carrée de la température absolue (température statique). Toutefois, la température de l'air statique n'étant pas mesurée directement par les capteurs de l'appareil, on fait appel à une méthode indépendante pour mesurer le nombre de Mach. L'équation de M s'écrit :

$$M^2 = \frac{2}{(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{p_s}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3.5)$$

Où p_0 désigne la pression statique (de l'écoulement d'air non perturbé); p_s la pression totale (toutes les deux indiquées par la sonde anémométrique) ; et γ

désigne le rapport des chaleurs massiques de l'air sec (C_p et C_v). On trouvera plus de détails dans les textes de référence sur l'aérodynamique des aéronefs tels qu'Abbott et von Doenhoff (1959) et Dommash, Sherby et Connolly (1958).

3.2.3.1 Incertitude des mesures

L'exactitude des mesures est déterminée presque exclusivement par l'exactitude des mesures fondamentales de pression. En conditions normales d'exploitation (la sonde anémométrique est alignée correctement et exposée à l'air libre), le nombre de Mach obtenu a une exactitude supérieure à 0,2 %.

3.3 TEMPÉRATURE DE L'AIR

3.3.1 Sonde thermométrique

La sonde thermométrique est exposée à un écoulement d'air libre et sert à déduire la température statique (écoulement d'air non perturbé). L'exactitude de la mesure de température de l'air est fondamentale pour les autres éléments météorologiques dérivés. Par exemple, on l'utilise pour calculer la vitesse propre, elle a donc une incidence sur le calcul

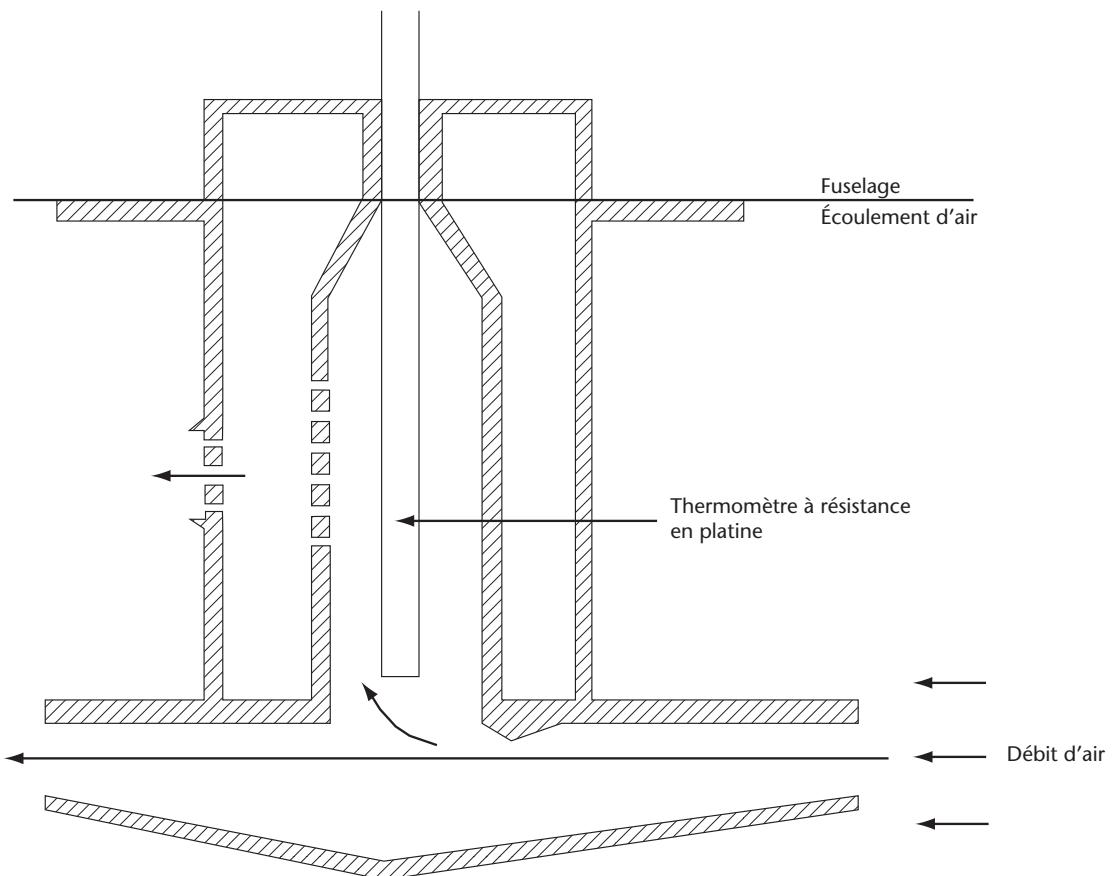


Figure 3.4. Sonde thermométrique d'aéronef

des composantes de la vitesse du vent. La centrale aérodynamique corrige la température réellement mesurée par la sonde d'après le nombre de Mach calculé.

La plupart des appareils commerciaux sont équipés de sondes thermométriques de type thermomètre à immersion. La figure 3.4 illustre un exemple type. L'élément récepteur est un thermomètre à résistance de platine. Le logement est conçu de façon à détourner les hydrométéores de l'élément récepteur, bien qu'on ait signalé (Lawson et Cooper, 1990) que celui-ci se mouille dans les cumulus.

La température (T_1) mesurée par la sonde est proche de la valeur théorique de la température totale qui se produirait en cas de compression adiabatique parfaite du courant d'air relatif au niveau de la sonde. La température de l'air statique (T_0 , en K), température du courant d'air relatif, est liée à la température mesurée suivant l'expression :

$$T_0 = \frac{T_1}{\left(1 + \lambda \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2\right)} \quad (3.6)$$

Où λ désigne le taux de récupération de la sonde, qui inclut l'effet de la viscosité et l'effet de la stagnation incomplète de l'air au niveau de la sonde. T_1 inclut éventuellement une compensation de la chaleur produite par le dégivrage.

Pour la sonde la plus couramment installée sur des appareils commerciaux, $\lambda = 0,97$, et sachant que $\gamma = 1,4$, la température de l'air statique devient :

$$T_0 = T_1 / (1 + 0,194 M^2) \text{ K} \quad (3.7)$$

Un avion à réaction commercial type volant à près de Mach 0,8, on obtient :

$$T_0 = T_1 / 1,124 \quad (3.8)$$

Autrement dit si $T_1 = 223 \text{ K}$ (-50°C), alors :

$$T_0 = 251 \text{ K} \text{ (-22°C)} \quad (3.9)$$

Ainsi, à l'altitude de croisière, la correction de la température est en général de -28°C .

3.3.1.1 Incertitude des mesures

La température de l'air statique est fonction de la température indiquée par la sonde et du nombre de Mach. Comme illustré ci-dessus, ce dernier est déduit de la pression totale et de la pression statique, elles-mêmes mesurées de façon indépendante par l'antenne anémométrique. L'incertitude de la mesure est fonction de trois sources d'erreurs possibles,

outre les erreurs d'étalonnage et de correction selon l'exposition, et d'autres effets tels que le dégivrage de la sonde par exemple.

L'erreur de température (ΔT_0) est liée à l'erreur sur le nombre de Mach (ΔM) suivant l'expression :

$$\Delta T_0 = 0,388 M T_1 (1 + 0,194 M^2)^{-2} \Delta M \quad (3.10)$$

Si l'on tient compte de ces différents facteurs, l'incertitude de la valeur de la température statique calculée est d'environ $0,4^\circ\text{C}$ à Mach 0,8, et passe à $0,3^\circ\text{C}$ pour des valeurs faibles de ce nombre. Les données de température sont généralement mémorisées sous forme de mots binaires de 11 bits. Ainsi, l'incertitude de chaque valeur mémorisée augmente d'environ $0,25^\circ\text{C}$. Si la sonde est mouillée par des nuages, elle se refroidit par évaporation, d'où une erreur supplémentaire d'environ 3°C . Si la vitesse propre est très faible (par exemple avant le décollage), l'écoulement d'air dans la sonde risque d'être insuffisant pour garantir l'exactitude des mesures. Sur certains appareils, on emploie des sondes ventilées pour résoudre ce problème, mais on peut négliger ce type de mesures généralement étrangères au champ d'observation du système AMDAR lorsqu'on étudie les erreurs du système. En dépit de la complexité du traitement des données à réaliser, l'expérience opérationnelle avec l'ASDAR (Système d'acquisition et de retransmission par satellite des données d'aéronefs) (OMM-N°462) fait ressortir que les erreurs de température moyennes à l'altitude de croisière sont d'environ 1°C .

3.4

VITESSE ET DIRECTION DU VENT

La mesure du vecteur vent tridimensionnel à partir d'un aéronef est une procédure complexe. À partir des données transmises par le système de navigation (généralement un système de radionavigation – NAV-AID) et le système anémométrique (généralement un tube de Pitot), associées aux données transmises par les capteurs de température, il est possible d'évaluer avec un degré élevé d'exactitude la vitesse (V_g) de l'aéronef par rapport à la Terre et la vitesse de l'air (V_a) par rapport à l'aéronef. On obtient donc le vecteur vent (V) à partir de l'équation :

$$V = V_g - V_a \quad (3.11)$$

Il convient de mesurer les vecteurs V_g et V_a avec exactitude dans la mesure où les vents horizontaux types sont faibles ($\geq 30 \text{ ms}^{-1}$) par rapport à la vitesse au sol et la vitesse propre de l'aéronef (200 à 300 ms^{-1}). Les premiers systèmes AMDAR dépendaient des données issues des systèmes de naviga-

tion par inertie pour la navigation à longue portée, exigeant la mesure des angles de tangage, de roulis, de lacet et de l'angle d'incidence vertical pour une résolution complète des vecteurs. Toutefois, ce n'est plus utile avec les systèmes modernes de navigation multi-capteurs pour produire des données de qualité opérationnelle (Service météorologique du Canada, 2003). Mais lorsque l'aéronef est équipé d'un système de navigation par inertie, pour une résolution complète des vecteurs, il convient de mesurer les angles de tangage, de roulis, de lacet et l'angle d'incidence par rapport aux filets d'air (figure 3.5). En palier normal, le tangage, le lacet et l'incidence sont très faibles et l'on peut ne pas en tenir compte. Cependant, en cours de manœuvre, les erreurs risquent d'être importantes, mais l'angle de roulis étant généralement élevé, on exclut habituellement les données relatives au vent lorsque cet angle est supérieur à un certain seuil (généralement 3 à 5°).

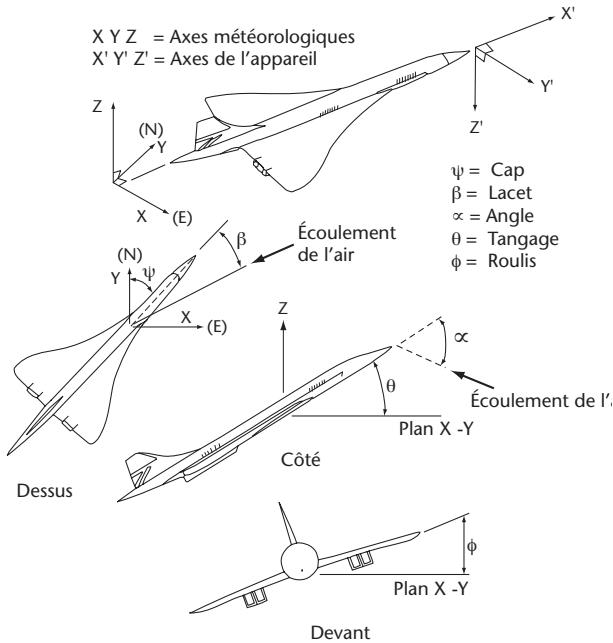


Figure 3.5.

Axes de référence et angles d'élévation d'un appareil

Dans la plupart des applications, seule la composante horizontale du vent est mesurée. Les données d'entrée nécessaires se réduisent par conséquent à la vitesse propre, au cap et à la vitesse au sol. Le cap et la vitesse au sol sont calculés par le système de navigation. Il convient de calculer la vitesse propre à partir du nombre de Mach et la température de l'air statique. Les composantes de vent horizontal (u, v) sont :

$$u = - / V_a / \sin f + u_g \quad (3.12)$$

$$v = - / V_a / \cos f + v_g \quad (3.13)$$

où $/ V_a /$ désigne la valeur de la vitesse propre; f le cap par rapport au nord vrai et u_g et v_g sont les composantes de la vitesse au sol.

3.4.1 Incertitude des mesures

La vitesse propre est fonction du nombre de Mach et de la température de l'air statique :

$$V_a (\text{kt}) = 38,867 M T_0^{1/2} \quad (3.14)$$

$$V_a (\text{kt}) = 38,867 T_1^{1/2} M / (1 + 0,194 M^2)^{1/2} \quad (3.15)$$

Si le nombre de Mach et la température de l'air statique sont tous deux erronés, l'erreur totale est donnée par :

$$\Delta V_a = 38,867 T_0^{1/2} \Delta M + 19,433 M T_0^{-1/2} \Delta T_0 \quad (3.16)$$

Où ΔV_a désigne l'erreur sur le vent; ΔM l'erreur sur le nombre de Mach et ΔT_0 l'erreur sur la température. Il convient de noter que d'après l'équation 3.10, l'erreur sur Mach peut également contribuer à une erreur de température.

À moins d'erreurs aberrantes sur la température, l'incertitude sur le nombre de Mach risque d'être la plus importante. Par exemple, pour une erreur de 0,2 % sur ce nombre à l'altitude de croisière, l'erreur sur la vitesse propre est égale à environ 1 kt ($0,5 \text{ m s}^{-1}$). Ainsi, si le système de navigation ne commet aucune erreur, on peut s'attendre à des erreurs sur le vecteur vent pouvant atteindre $0,5 \text{ m s}^{-1}$, lesquelles dépendent également de l'angle entre le vent à l'altitude de vol et du cap de l'appareil. Il convient de noter que les erreurs aberrantes de température entraîneront des erreurs aberrantes sur le vent.

Les erreurs relatives à la vitesse propre viennent s'ajouter à celle de la centrale inertielle de référence. Dans les calculs de base, on suppose un alignement parfait de l'appareil avec l'écoulement de l'air, des angles de roulis, de tangage et de lacet égaux à zéro et un alignement parfait de la plate-forme à inertie. Pour un angle élevé de tangage et de roulis, les erreurs sur le vecteur vent, proportionnelles à la vitesse propre, risquent d'être importantes. Par exemple, pour une vitesse propre de 150 kt pour angle de tangage de 5° et de roulis de 10°, on peut s'attendre à une erreur sur le vecteur vent d'environ 2 kt (1 ms^{-1}) quel que soit le vecteur vent vrai. Pour une vitesse propre de 300 kt, l'erreur sur le vent double pour atteindre 4 kt (2 ms^{-1}). Pour de faibles vitesses de vent, les erreurs sur le vecteur vent peuvent entraîner des erreurs importantes sur la direction du vent. Ainsi, compte-tenu de toutes les sources d'erreurs citées ci-dessus, et si l'on associe l'erreur sur la vitesse et la

direction du vent pour obtenir l'erreur sur le vecteur vent, on obtient en général une incertitude de 4 à 6 kt ($2\text{--}3 \text{ ms}^{-1}$). Ces estimations sont corroborées par l'expérience en exploitation (voir par exemple Nash, 1994).

3.5 TURBULENCE

La turbulence et, plus particulièrement la turbulence en air limpide (en l'absence de nuages), est un phénomène important et potentiellement dangereux pour l'aviation. Bien que les trajectoires de vol de routine des aéronefs commerciaux soient prévues pour éviter la turbulence, ceux-ci rencontreront inévitablement des secousses inattendues et les écarts par rapport au vol en palier normal peuvent être mesurés par l'instrumentation de bord.

3.5.1 Turbulence en accélération verticale

L'accélération verticale (perpendiculaire au plan de référence horizontal de l'aéronef) est mesurée par la centrale inertie de référence. Les données obtenues font référence et sont proportionnées à l'accélération due à la gravité. Elles peuvent être catégorisées comme illustré dans le tableau ci-dessous. Toutefois, la sévérité de la turbulence affectant l'aéronef dépend principalement de la vitesse propre, de la masse et de l'altitude de ce dernier, ainsi que de la nature de la turbulence elle-même. Par suite, les indications de turbulence d'un aéronef dérivées d'une accélération maximale selon la relation brute donnée au tableau ci-dessous, n'ont qu'une application limitée et sont particulières à l'aéronef, c'est ainsi qu'une rafale aura différents effets sur différents aéronefs.

Échelle de turbulence définie selon l'accélération maximale

Catégorie de turbulence	Accélération maximale*
Aucune	Inférieure à 0,15 g
Légère	De 0,15 g à 0,5 g exclus
Modérée	De 0,5 g à 1,0 g
Sévère	Supérieure à 1,0 g

* Ces accélérations, qui peuvent être positives ou négatives, constituent un écart par rapport à l'accélération de gravité normale (1,0 g).

3.5.1.1 Incertitude des mesures

Les instruments d'un aéronef sont à l'origine de deux grands types d'erreurs : les erreurs « à zéro » (de référence) et les erreurs instrumentales ou de mesure.

Dans la plupart des appareils, la valeur nominale de référence est égale à + 1 g, mais elle peut varier généralement de 3 %. Il est possible d'éliminer pratiquement une telle erreur par correction lorsque l'appareil est au sol, ce qui laisse une erreur résiduelle (notamment de mesure) d'environ 3 % des mesures (Sherman, 1985).

3.5.2 Dérivée de la vitesse des rafales verticales équivalentes

Il existe un autre indicateur de turbulence : la dérivée de la vitesse des rafales verticales équivalentes (DEVG), qui se définit comme étant la vitesse verticale instantanée des rafales qui, superposée à un vent horizontal régulier, produit l'accélération mesurée de l'appareil. L'effet d'une rafale sur un aéronef dépend de sa masse et d'autres caractéristiques, mais celles-ci peuvent être prises en compte de façon que la vitesse d'une rafale puisse être calculée indépendamment de l'appareil. La dérivée de la vitesse des rafales verticales équivalentes (Sherman, 1985) s'exprime ainsi :

$$U_{de} = \frac{Am\Delta n}{V_c} \quad (3.17)$$

Où U_{de} désigne la vitesse des rafales verticales équivalentes dérivées ; Δn le module de l'écart maximal de l'accélération verticale de l'appareil par rapport à 1 g, exprimé en g ; m la masse totale de l'appareil ; V_c la vitesse corrigée de l'appareil au moment de l'accélération de crête, et A un paramètre dépendant du type d'appareil et dans une moindre mesure de sa masse, de son altitude et du nombre de Mach.

3.5.2.1 Incertitude des mesures

Les erreurs commises sur chacun des termes de U_{de} ont été évaluées. En palier normal, elles sont en général inférieures à un maximum de 3 % pour chacun de ces termes et, dans les cas extrêmes, l'erreur totale peut atteindre 10 à 12 %. Si l'on suppose une distribution aléatoire des erreurs, l'incertitude type est en général égale à 3 à 4 % de la valeur finale de U_{de} . Les manœuvres d'un appareil peuvent entraîner une forte accélération verticale de celui-ci et, inversement, des techniques de contrôle actif peuvent réduire l'accélération due à des rafales, ce qui conduit à une sous-estimation importante de la vitesse des rafales verticales.

3.5.3 Taux de dissipation des tourbillons

Cette méthode (Cornman, Morse et Cunning, 1995) vise à caractériser le spectre des rafales verticales propre à l'air turbulent qui entoure un appareil par un seul paramètre $\epsilon^{1/3}$, à savoir le taux de dissipation des tourbillons (EDR). On obtient une

approximation du spectre d'énergie d'entrée des rafales aux fréquences présentant un intérêt avec l'équation :

$$\phi_i(\omega) = 0,7V^{2/3}\epsilon\epsilon^{2/3}w\omega^{-5/3} \quad (3.18)$$

Où V désigne la vitesse propre, et $w\omega$ la fréquence turbulente par rapport à l'appareil. $\epsilon^{1/3}$ est lié à la puissance totale du spectre des rafales (σ^2) divisée par un paramètre d'échelle de longueur ($L^{1/3}$) de telle façon que :

$$\epsilon^{1/3} \propto [\sigma^2/L^{1/3}]^{1/2} (\text{m}^{2/3} \text{s}^{-1}) \quad (3.19)$$

Étant donné la fonction de réponse de l'accélération verticale d'un appareil à des rafales verticales $H(\omega)$, le spectre d'énergie de sortie des rafales verticales $\phi_0(\omega)$ est donné par $H(\omega)$:

$$\phi_0(\omega) = |H(\omega)|^2 0,7V^{2/3}\epsilon\epsilon^{2/3}\omega^{-5/3} \quad (3.20)$$

et la puissance de sortie $\sigma_0^2(\omega)$ de l'accélération verticale par :

$$\sigma_0^2(\omega) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \phi_0(\omega) d\omega \quad (3.21)$$

$$\sigma_0^2(\omega) = 0,7V^{2/3}\epsilon^{2/3} \int |H(\omega)|^2 \omega^{5/3} d\omega \quad (3.22)$$

On choisit les limites de l'intégration, ω_1 et ω_2 , de façon à éliminer l'amplification basse fréquence de l'approximation spectrale des rafales, les basses fréquences étant dues aux manœuvres de l'appareil, au bruit et aux réactions de l'appareil aux hautes fréquences non modélisées par $H(\omega)$. En prenant l'intégrale ci-dessus $I(\omega_1, \omega_2, \omega)$ et en la réarrangeant, on obtient :

$$\epsilon^{2/3}(\omega) = \sigma_0^2(\omega)/0,7V^{2/3}I(\omega_1, \omega_2, \omega) \quad (3.23)$$

L'intégrale des réactions, qu'on peut déterminer pour un appareil donné, évolue relativement lentement avec le temps lorsque le poids de l'appareil et les conditions de vol varient. Sachant que le taux de dissipation des tourbillons et la puissance de sortie fluctuent avec le temps quand l'appareil fait face à diverses turbulences et que pour un intervalle de temps (T), $\sigma_0^2(\omega) = \sigma_0^2(t)$, on peut écrire :

$$\epsilon^{2/3}(wT) = \sigma_0^2(wT)/0,7V^{2/3}I(\omega_1, \omega_2, T) \quad (3.24)$$

où T désigne l'intervalle entre les mesures pour chaque évaluation du taux de dissipation des tourbillons.

Dans les applications pratiques, les accélérations verticales de sortie sont soumises à un filtrage

passe-bande pour correspondre à l'intégrale de la réponse et le terme σ_0^2 est évalué à partir de l'écart type d'échantillons continus de 10 s des valeurs filtrées. La bande passante est généralement définie entre 0,1 et 0,8 Hz. L'intégrale de la réponse de l'appareil est évaluée pour diverses conditions de vol et mémorisée dans des tables de recherche, ce qui réduit les besoins de calcul à bord et simplifie les calculs. Pour les liaisons descendantes, les données peuvent être réduites à une valeur médiane et à une valeur de crête sur l'intervalle entre les transmissions. La valeur de crête généralement choisie est le neuvième décile de cet intervalle.

3.5.3.1 Incertitude des mesures

Il existe pour le taux de dissipation des tourbillons comme pour la derive de la vitesse des rafales verticales équivalentes un grand nombre de sources d'erreurs susceptibles d'accroître l'incertitude des mesures. Si l'on se fonde sur l'analyse des erreurs commises sur la derive de la vitesse des rafales verticales équivalentes, on peut tabler sur une incertitude d'environ 5 à 10 % dans le processus de calcul. Le choix de l'intervalle d'échantillonnage et du temps d'intégration des valeurs moyennes complique encore les choses. L'analyse d'une série chronologique caractéristique de données sur l'accélération verticale indique souvent une forte variabilité des propriétés statistiques sur de courtes distances. La variation de la vitesse propre pour un appareil donné et entre divers types d'appareils modifie les distances d'échantillonnage et fait fluctuer les longueurs d'ondes filtrées.

3.5.3.2 Rapport entre le taux de dissipation des tourbillons et la dérivée de la vitesse des rafales verticales équivalentes

On a procédé sur le terrain à des comparaisons détaillées entre le taux de dissipation des tourbillons et la dérivée de la vitesse des rafales verticales équivalentes (Stickland, 1998) qui ont démontré une corrélation élevée entre le taux et la vitesse maximaux pour les mêmes turbulences. Ce résultat était prévisible, le taux de dissipation des tourbillons étant directement proportionnel à l'écart type de l'accélération verticale dans l'intervalle de mesure choisi. Ainsi, pour une distribution « normale », la valeur extrême sera en corrélation étroite avec la rafale verticale de crête (elle-même proportionnelle à l'écart de crête de l'accélération verticale). Il est clair que ce rapport ne s'applique pas à un événement isolé extérieur à la distribution admise et que la coupure du filtre du taux de dissipation des tourbillons à 0,8 Hz risque d'atténuer excessivement les très fortes rafales.

3.6

HUMIDITÉ RELATIVE

Bien qu'on ait fait appel, sur des appareils expérimentaux, à divers capteurs pour mesurer l'humidité relative (ou une variable connexe), et que certains sont en cours de développement et mettent en œuvre diverses technologies (notamment les technologies d'absorption mettant en œuvre des détecteurs capacitifs, à miroirs refroidis ou à lasers à diode), aucun capteur véritablement adapté n'est pour l'instant disponible à grande échelle. Un détecteur transistorisé à laser à diode en cours de mise au point aux États-Unis (Mai, 1998; Fleming, 2000; 2003), destiné à mesurer directement le rapport de mélange de la vapeur d'eau, pourrait avoir une exactitude pouvant atteindre quelques parties par million en volume. La technique est fondée sur l'absorption du rayonnement électromagnétique à bande étroite par la vapeur d'eau. L'intensité du rayonnement au niveau du capteur est liée au rayonnement émis par la loi de Beer de telle façon que :

$$I = I_0^{-kxp/p_0} \quad (3.25)$$

Où I désigne le signal reçu; I_0 le signal transmis; k le coefficient d'absorption; x la longueur du trajet; p la teneur en eau du volume de détection, et p_0 la concentration de vapeur d'eau pour une température et une pression normalisées.. Étant donné que I_0 , k , x et p_0 correspondent à des propriétés connues du système, la teneur en eau du volume échantillonné est mesurée et facilement convertie en rapport de mélange de la vapeur d'eau.

On a pu, en repliant la longueur de trajet, caser le capteur complet dans une sonde de température standard montée sur un aéronef. Le rapport de mélange de la vapeur d'eau étant conservé grâce à la compression adiabatique de la sonde contenant le capteur, la valeur mesurée peut être directement transmise au sol sans qu'on connaisse la température de l'air statique ou la température totale, ce qui est pratique pour les modèles numériques de l'atmosphère qui prennent l'humidité spécifique (presque impossible à différencier numériquement du rapport de mélange de la vapeur d'eau) comme variable d'entrée. Il faut souvent prendre l'humidité relative comme variable du champ d'humidité dans les champs d'analyse numérique. L'humidité relative est facile à calculer à partir du rapport de mélange de la vapeur d'eau si l'on connaît la température de l'air statique et la pression ambiante.

3.6.1

Incertitude des mesures

L'exactitude annoncée du système est d'environ 2 à 4 ppm en volume. Cependant, dans de nombreuses applications météorologiques, d'autres variables

psychrométriques telles que le point de rosée ou l'humidité relative sont nécessaires. L'exactitude de ces variables dérivées dépend non seulement de l'incertitude de la mesure de base du rapport de mélange de la vapeur d'eau, mais aussi de l'incertitude de la température de l'air statique et, dans une moindre mesure, de l'incertitude de la pression ambiante. Par exemple, on peut s'attendre à une incertitude relative d'environ 4 et 6 % pour une humidité relative réelle de 50 et 90 % respectivement, si l'incertitude de température est égale à 1 °C.

3.7

DÉGIVRAGE

Plusieurs types de détecteurs permettent de détecter la présence de givre sur les surfaces de vol. Les deux types actuellement utilisés sont les suivants :

- a) Un détecteur capacitif à couche mince, monté sur la surface portante ;
- b) Un capteur mécanique (capteur vibrant) exposé à l'écoulement d'air, situé dans une sonde adjacente à la surface de vol appropriée.

3.7.1

Incertitude des mesures

Pour l'essentiel, les détecteurs mentionnés ci-dessus transmettent un signal givre/absence de givre, et toute erreur se caractérise par la fréquence des fausses alertes. À ce jour, il n'existe pas de données sur une telle fréquence pour les détecteurs analysés.

3.8

SYSTÈMES PRATIQUES OPÉRATIONNELS

Un certain nombre de systèmes AMDAR sont actuellement en exploitation, notamment l'ASDAR, ainsi qu'un nombre croissant de systèmes VHF fondés sur le système ACARS (système embarqué de communication, d'adressage et de transmission). Ils transmettent tous des données en mode profil (montée/descente) de même qu'en mode croisière.

3.8.1

Système de retransmission par satellite des messages d'aéronefs (ASDAR)

L'ASDAR est un système d'observation spécialement conçu pour la Première expérience mondiale du Programme mondial de recherche atmosphérique (GARP), lequel après un développement satisfaisant du prototype, a été déployé par un consortium de Membres de l'OMM. L'ASDAR (OMM-N° 462) fait appel à un processeur de données spécialisé qui extrait les données brutes des systèmes de l'aéronef, calcule

les variables météorologiques voulues, puis structure et transmet un message météorologique codé par l'intermédiaire du Système international de collecte de données (SICD) des satellites météorologiques géosynchrones. Ce programme a officiellement pris fin en décembre 2003, mais des données sont encore produites par un faible nombre d'aéronefs.

3.8.2 **Système de transmission et de collecte de données météorologiques (MDCRS)**

Ce système est un système de transmission AMDAR type via ACARS. Le système de transmission et de collecte des données utilisé en Amérique du Nord (Taylor, Landot et Ligler, 1990) a été développé par Aeronautical Radio Inc. (ARINC) sous contrat avec la Federal Aviation Administration (FAA) des États-Unis d'Amérique. Ce système accepte les messages météorologiques des aéronefs commerciaux transmis vers la Terre via ACARS sous différentes formes particulières aux compagnies, il les transforme selon une structure commune avant de les retransmettre au Centre météorologique national de Washington DC.

des systèmes de communication. En conséquence, le futur système de navigation aérienne (FANS) est associé au développement d'un système de surveillance automatique par satellite (ADS), lui-même dépendant de la communication mondiale satellite-aéronef. Le système mondial de communication pour les aéronefs évolue vers un réseau ouvert relevant du Projet de réseau de télécommunications aéronautiques (ATN) (Wells et al, 1990). Il reliera les systèmes VHF et Satcom en un réseau ouvert commun.

Un routage météorologique réussi des aéronefs commerciaux, surtout pour assurer la sécurité, pour réduire la consommation de carburant, la fatigues des cellules et assurer le confort des passagers, demande une plus grande exactitude dans les prévisions aéronautiques. En conséquence, les messages automatiques de position de l'aéronef pour l'ADS permettent l'incorporation de messages météorologiques automatisés. Les données à inclure dans ces messages sont essentiellement les mêmes que celles des systèmes AMDAR actuels, y compris la prise en compte des éléments turbulence et humidité.

3.9 FUTURS SYSTÈMES AMDAR

Un certain nombre de systèmes de type AMDAR sont actuellement mis au point en vue d'améliorer la couverture mondiale et augmenter le nombre d'observations dans la couche limite et la basse troposphère. L'accent est mis sur le recrutement de petits aéronefs de l'aviation générale et régionale pour y installer soit un système traditionnel AMDAR, soit un système de détection et de communication spécialisé. Ces appareils sont exploités à partir d'un grand nombre de petits aéroports qui ne sont généralement pas desservis par les appareils traditionnellement équipés d'un système de transmission.

3.9.1 **Système de surveillance automatique de l'OACI**

Le développement des systèmes de navigation mondiaux est étroitement lié au développement

3.9.2 **Autres systèmes AMDAR**

Un nouveau système, actuellement développé aux États-Unis sous le nom de Système aéroporté de transmission de données météorologiques troposphériques (TAMDAR) (AirDat, 2003) fait appel à un système de détection et de transmission spécialisé destiné à être installé sur des petits aéronefs de l'aviation générale et régionale, volant à une altitude comprise entre 10 000 et 25 000 pieds. Ces appareils sont exploités sur des distances plus courtes et effectuent un plus grand nombre de décollages et d'atterrissements que les gros porteurs traditionnels.

D'autres systèmes sont en cours de développement au Canada, lesquels visent à fournir une couverture AMDAR dans les régions arctiques par l'intermédiaire de toute une gamme d'aéronefs différents et généralement plus petits.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Abbott, I.H. et A.E. von Doenhoff, 1959 : *Theory of Wing Sections*. Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 693 p.
- AirDat, 2003 : *TAMDAR – Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting Sensor and System Overview; AirDat Infrastructure and Global Capabilities*, document d'information, AirDat LLC, Evergreen, Colorado.
- Cornman, L.B., C.S. Morse et G. Cunning, 1995 : Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from in situ aircraft measurements, *Journal of Aircraft*, vol. 32, N° 1, p. 171–177.
- Dommasch, D.O., S.S. Sherby et T.F. Connolly, 1958 : *Airplane Aerodynamics*, New York, Pitman, 560 p.
- Fleming, R.J., 2000 : Water vapor measurements from commercial aircraft: Progress and plans. *Preprints*. Quatrième Colloque sur les systèmes d'observation intégrés, Long Beach, Californie, American Meteorological Society, p. 30–33.
- Fleming, R.J., 2003 : The WVSS-II and the UCAR air sampler: Purpose, design, status, communication personnelle, University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Holland, G. J., T. McGeer, et H. Youngren, 1992 : Autonomous aerosonde for economical atmospheric soundings anywhere on the globe, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73 p, 1987 à 1998.
- Lawson, R.P. et W.A. Cooper, 1990 : Performance of some airborne thermometers in clouds, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7, p. 480–494.
- May, R.D., 1998 : Open-path, near-infrared tuneable diode laser spectrometer for atmospheric measurements of H₂O. *Journal of Geophysical Research*, 103, p. 19161–19172.
- Organisation de l'aviation civile internationale, 1964 : *Manuel de l'atmosphère type OACI*, deuxième édition, Doc. 7488, Montréal.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : Development of the aircraft to satellite data relay (ASDAR) system (D.J. Painting). *Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-92)*, Rapport N° 49 de la série consacrée aux instruments et méthodes d'observation, OMM/TD-N° 462, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel de Codes*, volume I.1, OMM/TD-N° 06, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel de référence sur la retransmission des données météorologiques d'aéronefs (AMDAR)*, OMM/TD-N° 958, Genève
- Service météorologique du Canada, 2003 : *The Effect of Pitch and Roll Attitude on the Calculation of Wind*, rapport de G. Bruce, Aeromechanical Services Ltd., 1118-1c, révision 1.0.
- Nash, J., 1994 : Upper wind observing systems used for meteorological operations, *Annales Geophysicae*, volume 12, p. 691–710.
- Rodi, A.R. et P.A. Spyres-Duran, 1972 : Analysis of time response of airborne temperature sensor, *Journal of Applied Meteorology*, volume 11, p. 554–556.
- Sherman, D.J., 1985 : *The Australian Implementation of AMDAR/ACARS and the Use of Derived Equivalent Gust Velocity as a Turbulence Indicator*, Structures, Rapport N° 418, Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation, Aeronautical Research Laboratories, Melbourne, Victoria.
- Stickland, J.J., 1998 : *An Assessment of Two Algorithms for Automatic Measurement and Reporting of Turbulence from Commercial Public Transport Aircraft*, Rapport du Groupe d'étude sur l'information météorologique par liaison de données (METLINK) de l'OACI, Direction des observations et de l'ingénierie, Service météorologique australien, Melbourne.
- Taylor, D.L., D. Landot et G.T. Ligler, 1990 : Automated meteorological reports, *Minutes du Symposium des télécommunications aéronautiques sur l'intégration de liaisons de données*, Annapolis, Maryland, Mai 1990, p. 141–144.
- Wells, V.E. et al, 1990 : Migration of ACARS to the Aeronautical Telecommunication Network. *Minutes du Symposium des télécommunications aéronautiques sur l'intégration de liaisons de données*, Annapolis, Maryland, Mai 1990, p. 209–216.

CHAPITRE 4

OBSERVATIONS MARITIMES

4.1 GÉNÉRALITÉS

De manière générale, l'expression «observations maritimes» désigne l'ensemble des observations météorologiques et environnementales effectuées au niveau de l'interface océan-atmosphère, sous la surface de la mer et dans l'atmosphère au-dessus des océans (mesures en altitude). Le Manuel OMM (2003) expose en détail les exigences auxquelles sont tenues de se conformer les stations en mer. Des conseils sur les critères à respecter et les procédures à suivre sont présentés dans le guide de l'OMM (2001).

Ce chapitre décrit les observations réalisées au niveau de l'interface océan-atmosphère, qui font partie des mesures de surface effectuées également sur terre et décrites dans d'autres chapitres. Ce chapitre s'intéresse également à un certain nombre de mesures sous la surface qui sont importantes pour la physique marine et l'océanographie physique. En revanche, il ne sera pas question des mesures en altitude car celles-ci font appel à des techniques très proches de celles utilisées sur terre.

Ce chapitre est le seul du Guide à décrire la mesure et l'observation des vagues. Les méthodes visuelles sont présentées dans la section 4.2.12. Les techniques de mesure automatique sont examinées dans la section 4.3, bien que les mêmes techniques soient employées sur d'autres types de plates-formes que sur les bouées ancrées.

Les observations peuvent être effectuées à partir de plates-formes fixes ou mobiles, *in situ* ou à distance, par des appareils en surface ou dans l'espace. Les mesures *in situ* sont généralement relevées en un point unique que l'on estime représentatif du milieu marin environnant, comme en météorologie synoptique. La télédétection permet, pour sa part, d'appréhender de grands volumes ou de grands espaces, ce qui convient particulièrement bien à l'observation des glaces de mer.

• Mesures *in situ*

Ces observations sont faites à partir de plates-formes très différentes : navires recrutés par les Membres de l'OMM pour participer au programme de navires d'observation bénévoles (VOS), stations météorologiques océaniques, bateaux-feux automatiques ou non, bouées ancrées ou dérivantes, tours, plates-formes d'extraction de pétrole ou de gaz naturel, stations météorologiques automatiques situées sur des

îles ou sur des navires. Le type de plate-forme détermine principalement les éléments mesurés et signalés. Ainsi, les navires participant au programme VOS, sur lesquels on emploie des techniques d'observation à la fois manuelles et automatiques, transmettent l'ensemble des observations nécessaires à la météorologie synoptique. Ces observations sont le plus souvent compilées et transmises à terre en code FM 13 SHIP ou dans un format non conventionnel avant d'être diffusées sur le plan international dans le code approprié de l'OMM (par ex. FM 94 BUFR à partir de 2012). En revanche, la majorité des bouées dérivantes ne transmettent que trois paramètres : leur position, la pression atmosphérique à la surface de la mer et la température de la surface de la mer.

Sur recommandation de la JCOMM, on a créé un réseau de centres régionaux OMM/COI d'instruments maritimes¹ (RMIC) pour faciliter la normalisation des données d'observation, des métadonnées et des produits élaborés d'observation ainsi que pour établir des normes plus strictes pour les instruments et les méthodes d'observation. Ces centres peuvent fournir 1) des étalonnages et de la maintenance des instruments maritimes et des contrôles des performances de ces instruments ; 2) de l'assistance pour les comparaisons d'instruments ; 3) des formations complémentaires à celles des industriels. On en trouvera le mandat et les coordonnées à l'annexe 4.A.

• Mesures à distance

La télédétection maritime peut se faire à partir de la surface ou de l'espace. Les systèmes actuels de télédétection en surface permettent de mesurer ou d'observer les précipitations (radars météorologiques), les vents près de la surface (radars Doppler), les courants océaniques de surface, les vents de surface et l'état de la mer (radars à hyperfréquences pour les courtes portées et radars à hautes fréquences pour les longues portées, c'est-à-dire pour la détection trans-horizon). Ces différentes techniques sont décrites dans le chapitre 9 de la Partie II. Les méthodes de télédétection et de localisation des éclairs, exposées dans le chapitre 7 de la Partie II, sont également applicables au milieu marin.

Les systèmes de télédétection spatiale mesurent une multitude de variables en surface. Grâce au

¹ Sur recommandation de la Commission technique mixte OMM/COI d'océanographie et de météorologie maritime lors de sa troisième session, organisée en 2009.

perfectionnement de la technologie, ces plates-formes fournissent de plus en plus de données concernant l'état de la mer, les vents et la température de la surface de la mer sur tous les océans du globe. Soulignons toutefois que les mesures *in situ* sont essentielles pour valider et étalonner ces données. Les systèmes de télédétection à partir de l'espace sont décrits dans le chapitre 8 de la Partie II.

4.2 OBSERVATIONS À PARTIR DE NAVIRES

On trouvera dans cette section des recommandations et des conseils précis sur la façon d'effectuer des mesures et des observations à bord de navires. La référence OMM (1991a) pourra aussi être consultée. On trouvera dans OMM (2001), chapitre 6, des détails sur les observations de surface à réaliser dans le cadre du programme des navires d'observation bénévoles. Des études sur la qualité des observations émanant de navires sont présentées dans OMM (1991b et 1999), Kent et al. (2003), Taylor et al. (2003) et Kent et Berry (2005). Bradley and Fairall (2007) ont analysé les bonnes pratiques en matière d'observations dans le monde de la recherche.

4.2.1 Éléments observés

En général, les navires qui procèdent à des relevés météorologiques doivent être équipés pour observer les éléments suivants :

- a) La position du navire ;
- b) La route et la vitesse du navire ;
- c) La pression atmosphérique ;
- d) La température de l'air ;
- e) L'humidité (ou le point de rosée) ;
- f) La vitesse et la direction du vent.

En général, les navires qui procèdent à des observations manuelles devraient transmettre les éléments ci-dessus ainsi que les suivants (observations évaluées visuellement ou mesurées au moyen d'instruments puis enregistrées manuellement) :

- g) Le temps présent et passé et les phénomènes météorologiques² ;
- h) Les nuages (quantité, type et plafond) ;
- i) La visibilité² ;
- j) Les précipitations² ;
- k) La température de la surface de la mer ;
- l) Les vagues de la mer du vent et de la houle² (hauteur, période et direction) ;
- m) La glace de mer² et/ou l'accumulation de glace² sur le navire, le cas échéant.

² Ces éléments sont souvent évalués visuellement.

En ce qui concerne l'ordre à respecter, les observations sans instrument sont en principe réalisées avant les mesures instrumentales exigeant un éclairage, ceci afin de ne pas gêner l'adaptation de l'œil à l'obscurité.

En cas d'observation manuelle, les valeurs sont relevées dans les dix minutes précédant l'heure standard d'observation synoptique, à l'exception de la pression atmosphérique, qui est mesurée exactement à cette heure ou le plus proche possible de celle-ci.

4.2.2 Matériel nécessaire

Les navires doivent être équipés des instruments suivants :

- a) Un baromètre anéroïde de précision, anéroïde à cadran ou électronique numérique ;
- b) Un hygromètre ou un psychromètre ;
- c) Un barographe, de préférence à grande échelle (souhaitable mais non obligatoire) ou un baromètre numérique donnant une indication de la tendance barométrique ;
- d) Un thermomètre pour mesurer la température de l'eau, avec un récipient pour prélever un échantillon d'eau de mer ou un capteur constamment immergé (ou en contact avec la coque), avec un indicateur distant.

Il est recommandé de mesurer la force du vent au moyen d'anémomètres convenablement exposés plutôt que de procéder à une estimation visuelle, pourvu que ces instruments soient régulièrement contrôlés pour vérifier qu'ils restent bien étalonnés. Les pluviomètres sont rarement utilisés sur les navires d'observation.

Les instruments placés à bord de navires doivent être conformes aux spécifications stipulées ou recommandées dans d'autres chapitres du présent Guide, mises à part les modifications indiquées dans les sections suivantes de ce chapitre. Ils doivent être testés ou vérifiés régulièrement par les Services Météorologiques concernés.

4.2.3 Heures des observations

En général, des observations de surface sont réalisées à bord de navires de la façon suivante :

- a) Les observations synoptiques émanant de navires d'observation qui procèdent à des relevés manuels se font aux heures standard principales, soit 00 00, 06 00, 12 00 et 18 00 UTC. Lorsque des mesures supplémentaires sont nécessaires, elles sont effectuées à une ou plusieurs heures standard intermédiaires, soit 03 00, 09 00, 15 00 et 21 00 UTC ;

- b) Des observations horaires devraient être effectuées lorsqu'on utilise un système automatisé transmettant un message formaté en binaire (les observateurs sur les navires peuvent produire en outre des observations synoptiques complètes aux heures synoptiques, en incluant les éléments visuels supplémentaires) ;
 - c) S'il est impossible, pour des raisons opérationnelles, de procéder à des observations synoptiques à l'une des heures standard principales, le moment réel des observations doit être le plus proche possible de cette heure. Dans des cas spécifiques les observations peuvent même être réalisées une heure avant l'heure standard. Dans ce cas, l'heure de l'observation devrait être indiquée ;
 - d) Des observations devraient être faites également en dehors des heures principales en cas de tempête ou de risque de tempête ;
 - e) Lorsque les conditions météorologiques changent brusquement et dangereusement, des observations sont réalisées et transmises immédiatement, à n'importe quelle heure de la journée (par exemple à moins de 300 milles marins d'un système tropical baptisé) ;
 - f) Les observations maritimes, aussi valables dans les zones côtières qu'au large, devraient se poursuivre pendant l'ensemble du voyage.
- 4.2.4 Automatisation des observations à bord de navires et transmission de données**

4.2.4.1 Automatisation des observations de navires

On fait de plus en plus appel à des stations météorologiques automatiques ou semi-automatiques à la fois pour l'observation et pour la transmission des données à partir des navires. Elles fonctionnent selon l'une des trois modalités suivantes :

- a) L'observation est effectuée manuellement, les valeurs sont généralement saisies dans un logiciel dédié sur un ordinateur, chiffrées au besoin et mises en forme avant la transmission déclenchée automatiquement ou manuellement ;
- b) L'observation est effectuée automatiquement au moyen de techniques standards employées dans les stations météorologiques automatiques décrites dans le chapitre 1 de la Partie II. Les données concernant la position, le cap et la vitesse du navire sont extraites des appareils de navigation (gyrocompas par exemple) ou calculées indépendamment grâce à un système de navigation par satellite, en général le système de positionnement global (GPS). La transmission peut être entièrement automatique ou déclenchée à la main selon les équipements de communication disponibles ;
- c) Les observations sont en partie automatiques et en partie manuelles : aux observations automatiques s'ajoutent des observations visuelles saisies par l'observateur avant la transmission (données sur la visibilité, les temps présent et passé, la nébulosité, le type et la hauteur des nuages, la hauteur, la période et la direction des vagues, les paramètres relatifs à la glace ainsi que la vitesse et la direction du vent lorsqu'elles ne sont pas mesurées par un anémomètre).

4.2.4.2 Transmission des observations de navires

Actuellement, les systèmes de communication par satellite sont largement utilisés pour transmettre les observations de navires. On trouvera des détails dans OMM (2001), section 6.6. Les quatre méthodes suivantes sont disponibles :

- a) Le Système international de Collecte de Données, par le biais de satellites météorologiques géostationnaires (GOES, METEOSAT, MTSAT). Ce réseau, financé essentiellement par les Services Météorologiques Nationaux (SMN), assure une transmission entièrement automatique de données dans des créneaux prédéfinis, toutes les heures. La communication est unilatérale et le taux d'erreur peut être important. On l'emploie généralement avec des stations météorologiques automatiques embarquées sur navires et sur des bouées ancrées ;
- b) Des services satellitaires commerciaux, par exemple le système INMARSAT-C, qu'on trouve à bord de la majorité des navires en mer, conformément aux exigences de la convention SOLAS. Généralement, les observations météorologiques sont transmises à une station terrestre, avec le code d'accès spécial 41 ou une variation régionale de celui-ci, bien que le service data report d'Inmarsat serve également à l'envoi de données compressées émanant de stations météorologiques automatiques. La technologie Inmarsat est utilisée par la plupart des stations non automatiques ;
- c) Des services satellitaires commerciaux tels qu'Iridium Short Burst Data, qui font appel à des systèmes binaires formatés pour réduire les coûts de communication et améliorer la vitesse de transmission des données ;
- d) Le service Argos : ce système, conçu essentiellement pour la localisation et la transmission de données, est limité par le nombre et les caractéristiques orbitales des satellites défilant de la NOAA qui transportent le dispositif Argos. Le système est employé pour la transmission et le traitement des observations de navires sur

le SMT (OMM, 1995a), mais il peut y avoir des délais de plusieurs heures et les frais de communications sont importants. En général, Argos est utilisé pour de petites stations météorologiques automatiques autonomes et pour des bouées dérivantes.

Pour réduire les frais de communication, certains SMN font appel à des méthodes de compression afin de réduire le volume de données transmises par les navires lors de chaque observation. Ce service est généralement assuré grâce à un arrangement particulier entre le SMN et un fournisseur de télécommunications.

4.2.5 Vent

La vitesse et la direction du vent peuvent être estimées visuellement ou mesurées par des anémomètres ou des anémographes. Il est préférable de mesurer le vent que d'en faire une évaluation visuelle.

Sur les navires équipés d'instruments, l'observation relevée doit être la moyenne du vent au cours d'une période de dix minutes. Si le navire se déplace, il faut distinguer le vent relatif du vent vrai. C'est le vent vrai que l'on transmet dans les observations météorologiques, bien que sur les navires de classe VOS-CLim, on signale également le vent apparent. On peut tracer un simple diagramme vectoriel ou utiliser une table de calcul du vent vrai à partir du vent relatif observé et de la vitesse et du cap du navire (Bowditch, 2002). Dans la pratique, cette conversion vectorielle introduit fréquemment des erreurs dans les valeurs de vent transmises. En général, les logiciels de saisie utilisées, comme TurboWin, calculent automatiquement le vent vrai.

Une station météorologique automatique calcule le vent vrai à partir de la mesure du vent relatif, de la route, du cap et de la vitesse d'un navire. Il est préférable de recueillir ces données à partir d'un compas magnétique et des informations de positionnement propres au navire. On peut aussi les déduire du déplacement du navire obtenu par un récepteur GPS, mais dans ce cas, on ne tient pas compte de la dérive.

La connaissance de métadonnées sur le navire (type d'observation du vent, type de navire, taille, position de l'anémomètre et hauteur) est particulièrement importante pour les observations sur le vent. Les métadonnées, employées en particulier pour interpréter les données correctement et améliorer leurs cohérences (par ex. correction des erreurs systématiques), assurent la traçabilité par rapport aux normes.

4.2.5.1 Observations visuelles du vent

Elles sont établies en considérant l'aspect de la surface de la mer. La vitesse du vent est donnée

par l'échelle de Beaufort (voir tableau). Pour déterminer la direction du vent, on observe l'orientation des crêtes des vagues de la mer du vent (c'est-à-dire les vagues produites par le vent et non la houle) ou la direction des bandes d'écume poussées par le vent. Les spécifications des chiffres de l'échelle de Beaufort font référence aux conditions en haute mer. En général, la direction du vent est convenablement déterminée par la méthode visuelle.

La hauteur des vagues n'est pas en soi un paramètre très fiable pour établir la vitesse du vent, car elle dépend également du fetch et de la durée du vent, de la profondeur des bas-fonds et de la présence de houle. Dans l'échelle de Beaufort, on considère par conséquent le rapport entre l'état de la mer et la vitesse du vent. Mais d'autres facteurs interviennent dans ce rapport, qui devraient normalement être intégrés dans l'estimation de la vitesse du vent. Ces facteurs sont le décalage entre le renforcement du vent et le soulèvement des vagues, l'atténuation des effets du vent à la surface de la mer par une pluie forte et les modifications de l'aspect de la mer provoquées par de forts courants de surface, par exemple les courants de marée. L'aspect de la mer est un indice moins fiable en eau peu profonde et à proximité des côtes, à cause des courants de marée et de la barrière formée par la terre. Si le navire vogue dans ces eaux ou si la surface de la mer n'est pas parfaitement visible (par ex. la nuit), on peut estimer la force du vent relatif sur l'échelle de Beaufort en observant les effets du vent sur les sons, sur certains objets se trouvant à bord du navire, notamment les drapeaux, et sur le panache de fumée. Ce dernier permet également de déterminer la direction du vent relatif. Il est ensuite possible de calculer la vitesse et la direction du vent vrai à partir de ces estimations (UK Meteorological Office, 1995). S'il n'existe pas d'autre moyen d'évaluer la direction du vent, les déplacements des nuages à basse altitude peuvent s'avérer utiles.

4.2.5.2 Mesures de vent à partir d'instruments

Les instruments installés à bord de navires doivent donner à la fois la vitesse et la direction du vent, tout en minimisant les effets du roulis (les anémomètres à coupelles bien conçus et les girouettes correctement stabilisées sont pratiquement insensibles au roulis et au tangage).

Les métadonnées doivent être fournies pour indiquer les instruments utilisés, comment ils sont installés à bord du navire (position et hauteur) et pour connaître les détails sur le type de navire car la mesure du vent subit l'influence de l'écoulement d'air sur sa structure (Yelland et al., 2001).

Échelle de Beaufort (force)	Terme descriptif	Vitesse du vent équivalente		Spécifications pour les observations À bord de navires (au large)
		m s ⁻¹	Nœuds	
0	Calme	0 - 0,2	< 1	La mer est comme un miroir
1	Très légère brise	0,3 - 1,5	1 - 3	Il se forme des rides ressemblant à des écailles de poisson, mais sans aucune crête d'écume.
2	Légère brise	1,6 - 3,3	4 - 6	Vaguelettes, courtes encore, mais plus accentuées ; leurs crêtes ont une apparence vitreuse, mais elles ne déferlent pas.
3	Petite brise	3,4 - 5,4	7 - 10	Très petites vagues ; les crêtes commencent à déferler, écume d'aspect vitreux ; parfois quelques moutons épars.
4	Jolie brise	5,5 - 7,9	11 - 16	Petites vagues devenant plus longues ; moutons franchement nombreux.
5	Bonne brise	8,0 - 10,7	17 - 21	Vagues modérées prenant une forme plus nettement allongée, naissance de nombreux moutons (éventuellement des embruns).
6	Vent frais	10,8 - 13,8	22 - 27	Des lames commencent à se former ; les crêtes d'écume blanche sont partout plus étendues (habituellement quelques embruns).
7	Grand frais	13,9 - 17,1	28 - 33	La mer grossit ; l'écume blanche qui provient des lames déferlantes commence à être soufflée en traînées qui s'orientent dans le lit du vent.
8	Coup de vent	17,2 - 20,7	34 - 40	Lames de hauteur moyenne et plus allongées ; du bord supérieur de leurs crêtes commencent à se détacher des tourbillons d'embruns ; l'écume est soufflée en très nettes traînées orientées dans la direction du vent.
9	Fort coup de vent	20,8 - 24,4	41 - 47	Grosses lames ; épaisses traînées d'écume dans la direction du vent ; les crêtes des lames commencent à s'écrouler et à déferler en rouleaux ; les embruns peuvent réduire la visibilité.
10	Tempête	24,5 - 28,4	48 - 55	Très grosses lames à longues crêtes en panache ; l'écume produite s'agglomère en larges bancs et est soufflée dans la direction du vent en épaisses traînées blanches ; dans son ensemble, la surface des eaux semble blanche ; le déferlement en rouleaux devient intense et brutal ; la visibilité est réduite.
11	Violente tempête	28,5 - 32,6	56 - 63	Lames exceptionnellement hautes (les navires de petit et de moyen tonnage peuvent par instants être perdus de vue) ; la mer est complètement recouverte de bancs d'écume blanche élongés dans la direction du vent ; partout le bord des crêtes des lames est soufflé et donne de la mousse ; la visibilité est réduite.
12	Ouragan	32,7 et plus	64 et plus	L'air est plein d'écume et d'embruns ; la mer est entièrement blanche du fait des bancs d'écume dérivante ; la visibilité est très fortement réduite.

Il est souvent difficile d'exposer correctement les instruments de mesure du vent sur les navires (Taylor et al., 2003; Yelland et al., 2001 ; Moat et al., 2006). Pour réduire autant que possible les effets locaux des superstructures, des mâts et des espars, l'appareil doit être disposé le plus haut et le plus en avant possible. Si on le fixe à une vergue, il est parfois préférable de choisir un modèle dont les têtes de mesure de la vitesse et de la direction sont séparées. Cela répartit le poids sur la vergue et permet de disposer les instruments davantage à l'extérieur. Qu'il soit fixé à une vergue ou sur le mât de misaine, chaque instrument

doit être placé à une distance du mât au moins égale à dix fois le diamètre de celui-ci. Si ce n'est pas possible, une bonne solution consiste à monter deux appareils de part et d'autre du mât et d'utiliser celui qui est le mieux exposé au moment de l'observation. Le sommet du mat de misaine est souvent le meilleur emplacement pour un anémomètre.

Le milieu marin étant rude, les anémomètres à couppelles ou à pales doivent être entretenus et étalonnés régulièrement pour produire des données fiables de vent. Les anémomètres à ultrasons, qui ne compor-

tent pas de pièces mobiles, exigent moins d'entretien et sont de plus en plus employés sur les navires.

Il arrive que l'on emploie divers modèles d'anémomètres portables à bord des navires (souvent pour faciliter la mise à quai des navires). Ils présentent l'inconvénient d'être extrêmement difficiles à exposer correctement, ce qui se traduit par des mesures très divergentes. Seul un observateur comprenant bien la nature de l'écoulement d'air au-dessus du navire dans différentes conditions est en mesure de choisir le meilleur emplacement pour effectuer ce genre d'observations et parvenir à des résultats satisfaisants. Ces appareils sont parfois utiles lorsqu'une estimation visuelle est difficile ou impossible, par exemple la nuit par vent faible.

4.2.6 Pression atmosphérique, tendance de pression et caractéristique de cette tendance

4.2.6.1 Méthodes d'observation

La pression peut se mesurer à l'aide d'un baromètre anéroïde de précision, d'un baromètre anéroïde à cadran ou d'un baromètre électronique numérique.

En cas d'observation manuelle, la caractéristique et l'ampleur de la tendance de la pression au cours des trois dernières heures sont généralement déterminées à l'aide d'un barographe pour milieu marin, à grande échelle de préférence, dont chaque division correspond à un hectopascal. Toutefois, on se sert de plus en plus de baromètres numériques avec écrans à cristaux liquides pour obtenir la tendance de la pression.

Avec les stations météorologiques automatiques, la caractéristique et la valeur de la tendance de la pression au cours des trois dernières heures sont calculées à partir des quatre dernières valeurs horaires de la pression (H, H - 1, H - 2, H - 3).

4.2.6.2 Instruments

Tous les baromètres devraient être conformes aux exigences générales présentées dans le chapitre 3 de la Partie I et être accompagnés d'un certificat donnant le cas échéant les corrections à appliquer aux indications de chaque instrument. Les baromètres devraient être précis à 0,1 hPa près. Les exigences concernant l'incertitude des mesures opérationnelles et les performances des instruments sont stipulées dans le chapitre 1, annexe 1.B de la Partie I. L'incertitude autorisée pour les mesures est de moins de 0,1 hPa (et de moins de 0,2 hPa après réduction au niveau de la mer). L'incertitude des mesures ne doit jamais excéder 0,3 hPa. Les barographes pour milieu marin devraient être dotés d'un dispositif

d'amortissement, par exemple un bain d'huile dans lequel est placé le boîtier anéroïde ou un amortisseur à piston raccordé au levier, afin d'éviter les brusques variations de pression provoquées par les rafales de vent et les mouvements du navire. Le baromètre et le barographe devraient être munis d'une prise d'air de pression statique donnant sur l'extérieur, de façon à ce que les relevés puissent être plus précis et qu'ils ne subissent pas l'influence des zones hermétiques ou des courants d'air. Si cela n'est pas possible, des instructions devraient être données pour que les portes des passerelles soient ouvertes avant toute observation. Cela est particulièrement important sur les navires récents équipés de locaux pressurisés ou de navires qui transportent des matières dangereuses, dont la timonerie peut être fermée hermétiquement.

En général (mais pas dans tous les cas), les Services Météorologiques Nationaux règlent les baromètres anéroïdes de précision et les baromètres électroniques à la pression «au niveau de la station». Ainsi, les observations doivent être corrigées en fonction de la hauteur du baromètre pour indiquer la pression au niveau de la mer. Cette correction selon la hauteur est calculée automatiquement par le logiciel de saisie Turbowin par exemple. En général, les baromètres anéroïdes à cadran sont réglés de façon à indiquer la pression au niveau de la mer.

4.2.6.3 Exposition et mode d'exploitation

Les baromètres et les barographes doivent être montés sur un support amortisseur, dans un endroit où ils seront peu perturbés par les chocs, les vibrations et les mouvements du navire. En général, plus on s'approche du centre de flottaison, meilleurs sont les résultats. Le stylet porte-plume du barographe doit être orienté en travers pour ne pas sortir du graphique.

4.2.6.4 Corrections

Les corrections suivantes doivent être apportées aux valeurs observées :

- Erreur systématique de l'instrument ;
- Réduction au niveau de la mer selon les besoins ;
- Température (si nécessaire et si les tables de correction sont fournies).

Les baromètres doivent être stabilisés en température. Sinon, il faut consulter la table de correction de température qui accompagne l'instrument et munir celui-ci d'un thermomètre. Une table de réduction à la pression au niveau de la mer doit également être fournie lorsque les baromètres sont réglés à la hauteur de la station, bien que cela ne soit pas obligatoire sur les navires où l'on fait appel à des logiciels de saisie susceptibles d'appliquer automatiquement une correction de hauteur (Bowditch, 2002, tableaux 29-34).

4.2.6.5 Sources d'erreurs

Cette question est étudiée dans le chapitre 3 de la Partie I, mais des erreurs importantes peuvent survenir sur les navires en raison des effets du vent sur la pression à l'intérieur du boîtier dans lequel le baromètre est placé. Pour minimiser cette source d'erreurs, il convient autant que possible de placer l'instrument dans une pièce raccordée à une prise de pression statique ou de relier le conduit directement à cette prise.

Sur les appareils non automatiques, les erreurs humaines sont dues le plus fréquemment à une absence de réduction au niveau de la mer, à une appréciation erronée de la hauteur du baromètre ou à une double correction non intentionnelle (correction appliquée à un baromètre qui donne déjà la pression au niveau de la mer).

4.2.6.6 Vérification au moyen d'étalons

Les baromètres et les barographes doivent être vérifiés aussi souvent que possible, mais au moins à trois mois d'intervalles approximativement, par rapport au baromètre étalon d'un bureau météorologique de port ou d'un baromètre étalon de transfert. Toutefois, comme les déplacements des navires peuvent être hautement dynamiques, cela n'est pas toujours possible. L'agent météorologique de port devrait rédiger un rapport sur toutes les comparaisons et fixer sur le baromètre une étiquette d'étalonnage indiquant la date de vérification et la correction à apporter. En particulier, il est important de contrôler plus fréquemment les baromètres et barographes quand ils sont nouveaux.

Certains modèles de baromètres numériques, beaucoup plus stables, peuvent n'être étalonnés que tous les deux ans.

4.2.7 Nuages et temps

L'observation des nuages et du temps à partir de navires se fait de la même manière qu'à partir du sol (voir les chapitres 14 et 15 de la Partie I, ainsi que l'annexe 4.B, dans laquelle sont décrites diverses formes de précipitations). L'agent météorologique de port doit donner des instructions précises et des conseils pratiques aux observateurs en mer, qui sont, pour la plupart, des bénévoles. La majeure partie des logiciels de saisie incluent de nombreuses images de nuages pour les aider à en identifier les types.

Il faut estimer la hauteur de la base des nuages si le navire n'est pas équipé des instruments de mesure. Pour réaliser cette tâche le plus précisément possible, les observateurs devraient comparer leurs esti-

mations à des hauteurs connues chaque fois qu'ils en ont l'occasion, par exemple lorsque la base des nuages passe devant une côte montagneuse, même si dans ce cas précis, le plafond risque d'être plus bas en montagne qu'en mer.

Un projecteur de plafond n'est pas très utile à bord d'un navire en raison de la petite taille des hauteurs de référence. Il est nettement préférable d'employer un instrument qui n'a pas besoin de référence, comme un cimètère laser (voir le chapitre 15 de la Partie I). Cet appareil doit pouvoir être utilisé par l'officier de quart sur la passerelle de navigation.

4.2.8 Visibilité

L'absence d'objet pouvant servir de repère rend l'évaluation de la visibilité plus incertaine en mer qu'à terre.

Sur les gros bâtiments, quand la visibilité est très réduite, il est possible de prendre comme points de repère des objets à bord (comme le mât de misaine), mais il faut savoir que ces estimations risquent de comporter des erreurs, car l'air ambiant est en général modifié par la présence du bateau. Quand la visibilité est meilleure, l'aspect de la terre pendant la navigation en vue des côtes est un bon guide. Si l'on connaît la position du navire, la distance des amers au moment où ils apparaissent ou disparaissent peut être déterminée à partir des cartes. De même, en haute mer, quand d'autres bateaux sont en vue et que l'on connaît leur distance, par exemple grâce à un radar, une estimation peut être faite. En l'absence de tout objet éloigné, l'estimation peut se fonder sur l'aspect de l'horizon, observé à partir de différentes hauteurs. Même si une réfraction anormale risque d'introduire des erreurs, c'est parfois la seule méthode dont on dispose. La nuit, l'aspect des feux de navigation donne souvent de bonnes indications sur la visibilité.

Si la visibilité change selon l'endroit où se porte le regard, l'évaluation ou la mesure doit être effectuée dans la direction de visibilité la plus faible et une note doit être saisie dans le journal (en ne tenant pas compte de la réduction de visibilité produite par les fumées du navire).

Il est question des instruments de mesure de la visibilité dans le chapitre 9 de la Partie I. On ne peut utiliser sur les navires que des appareils pouvant fonctionner avec un point de référence ou un faisceau lumineux assez court. C'est le cas des diffusomètres.. Malheureusement, les mesures risquent d'être faussées par l'effet thermique du navire et par ses échappements.

4.2.9

Température de l'air et humidité

On mesure la température de l'air et l'humidité au moyen d'un hygromètre ou d'un psychromètre doté d'une bonne ventilation.

L'appareil doit être convenablement placé dans un flux d'air provenant directement de la mer, sans avoir été en contact avec le navire ou être passé par-dessus, et doit être convenablement protégé des rayonnements, des précipitations et des embruns.

Les psychromètres à crècelle ou à aspiration s'avèrent satisfaisants quand on les expose du côté au vent. Dans le cas où l'appareil est actionné manuellement, la température doit être relevée dès que possible après l'arrêt de la ventilation. Il faut plusieurs minutes pour acclimater les hygromètres portatifs au milieu ambiant s'ils ont été rangés à l'intérieur avant d'être utilisés.

On a constaté que les hygromètres capacitifs fonctionnent correctement même dans un milieu très salin. Ces capteurs électroniques d'humidité et de température peuvent être utilisés avec des stations automatiques ou pour des observations manuelles. Ces appareils, plus précis, doivent être ré-étalonnés tous les ans.

Pour les observations manuelles, si l'on utilise des abris météorologiques, deux abris devraient être fournis et installés, un de chaque côté du bateau pour être toujours en mesure de procéder aux observations du côté au vent. Les thermomètres et hygromètres seront ainsi bien exposés au courant d'air et protégés des sources artificielles de chaleur et de vapeur d'eau. On peut aussi suspendre un seul abri mobile face au vent pour obtenir le même résultat. La mèche de mousseline qui recouvre le globe d'un thermomètre mouillé doit être remplacée au moins toutes les semaines, et plus souvent en cas de tempête.

Si l'on se sert d'une station météorologique automatique ou d'une unité d'affichage numérique distante, une lecture manuelle des instruments à l'écran n'est plus nécessaire et un seul abri peut être installé suffisamment loin de la structure du navire pour donner des mesures représentatives de l'humidité relative et de la température de l'air.

L'entretien des psychromètres doit se faire conformément aux recommandations énoncées dans le chapitre 4 de la Partie I. On utilise de l'eau distillée pour les thermomètres mouillés. A défaut, il est préférable d'employer l'eau de condensation que de l'eau douce ordinaire. Il ne faut jamais utiliser d'eau polluée par des traces d'eau de mer, toute trace de sel affectant considérablement la température du thermomètre mouillé.

4.2.10

Précipitations

Les techniques de mesure des précipitations en mer sont analysées dans OMM (1962 et 1981). Pour faciliter le travail des observateurs, l'Annexe 4.B contient une description des différentes formes de précipitations en mer, avec la terminologie à employer pour signaler le temps présent.

Si les mesures des précipitations ne sont normalement pas signalées par les navires d'observation bénévoles grâce au chiffre du code iR = 4, elles peuvent néanmoins être indiquées par des stations fixes ou par des navires équipés d'un pluviomètre au moyen du chiffre du code iR approprié.

4.2.10.1 **Mesures et instruments**

Il convient de déterminer à la fois le cumul et la durée des précipitations. Le cumul est établi au moyen d'un pluviomètre adapté à l'observation en mer. Il est recommandé de relever les mesures toutes les six heures. Jusqu'à un cumul de 10 mm, la résolution doit être de 0,2 mm. Pour les valeurs plus élevées, ce chiffre doit correspondre à 2 % du total. L'exactitude requise est identique aux valeurs indiquées pour la résolution. La durée de précipitation est arrondie aux cinq minutes les plus proches.

Il n'est pas facile d'obtenir une mesure fiable des précipitations à bord d'un navire en raison de l'effet aérodynamique des superstructures, de l'influence du roulis et du tangage, de la présence d'embruns et du déplacement du navire. Le matériel employé doit être construit et exposé de manière à supprimer ou à réduire le plus possible les trois premiers facteurs susmentionnés.

Les mesures de précipitation effectuées à partir de stations fixes (bateaux-feux, navires météorologiques, grosses bouées, tours, etc.) sont particulièrement utiles, car l'effet du déplacement du navire est supprimé et que ces données peuvent être intégrées aux analyses climatologiques sans restriction. Cependant, le mouvement des plates-formes et la contamination saline doivent toujours être pris en considération.

• *Pluviomètre monté sur cardan*

L'instrument le plus couramment utilisé pour mesurer les précipitations à bord des navires est le pluviomètre sur cardan. Ce type de montage n'est pas très efficace, surtout par gros temps, car l'appareil n'est pas constamment maintenu à l'horizontale. Un bon montage sur cardan est très complexe et coûteux, raisons pour lesquelles on n'en équipe que les navires spécifiques. Par conséquent, il est souvent préférable de choisir une installation fixe avec une mesure déportée.

• *Pluviomètre marin conique*

Cet appareil est en principe fixé en hauteur sur un mât. Un tuyau en plastique amène l'eau dans un collecteur placé sur le pont ou dans la timonerie. C'est un bon système quand on a pris les précautions voulues pour l'installation. L'orifice du pluviomètre doit être maintenu dans un plan parallèle au pont du navire.

• *Pluviomètre enregistreur*

Il existe trois modèles de pluviomètres enregistreurs pour les observations en mer. Le premier type de capteur est placé à l'air libre et l'enregistreur à l'intérieur. L'eau est acheminée par un tuyau jusqu'à un récipient situé à proximité de l'enregistreur. Un stylo raccordé au flotteur placé dans le récipient enregistre les variations du niveau d'eau sur un tambour rotatif. Le réservoir se vide automatiquement par un siphon lorsque le cumul d'eau correspond à 20 mm de précipitation.

Le deuxième modèle de capteur fonctionne par contacts électriques. L'eau de pluie recueillie dans le collecteur est placée temporairement dans un réservoir. Lorsque le niveau atteint correspond à 0,5 mm de pluie, la surface de l'eau touche une aiguille qui établit un circuit électrique. Un moteur ferme la soupape d'admission et ouvre simultanément la soupape de décharge. Quand le réservoir est vide, les soupapes reviennent à leur position initiale et une impulsion est transmise à l'enregistreur. Des erreurs peuvent survenir lorsque, à cause du balancement du navire ou de la bouée, le niveau d'eau fluctue au lieu de s'élever progressivement. On peut y pallier en installant une pompe péristaltique afin qu'un volume donné d'eau (et non plus la totalité) soit aspiré chaque fois que le contact est établi. Ce type d'installation est moins sensible aux fluctuations du niveau d'eau et ne comporte aucune soupape à entretenir.

L'observation des précipitations par radar exige un appareil à faisceau étroit, des pluviomètres d'étaffonnage et d'autres équipements spéciaux pour surveiller l'état du radar et appliquer les corrections nécessaires. Les radars placés à bord de navires ne présentent pas ces caractéristiques, car ils ont été conçus à d'autres fins. Leur utilisation pour observer les précipitations n'est pas une procédure normale.

Il existe un troisième type de pluviomètre enregistreur : il s'agit d'un pluviomètre marin spécialement conçu pour les navires, utilisant un collecteur omnidirectionnel horizontal et vertical qui permet de mesurer la pluie en cas de grand vent (Hasse et al. (1998)). En mesurant la quantité d'eau recueillie à la surface du collecteur vertical, on peut corriger l'effet du vent en faisant intervenir sa vitesse mesurée

simultanément proche de l'instrument. L'intensité et le cumul de pluie sont mesurés et calculés séparément par le collecteur du haut et les collecteurs latéraux et l'on obtient des valeurs corrigées de la pluie en moyennant ces cumuls pondérés par la vitesse du vent.

• *Exposition*

Les pluviomètres doivent être exposés de manière à réduire les trois premiers effets mentionnés précédemment. À bord des navires, il est recommandé de les placer le plus en avant et le plus haut possible. Toutefois, d'autres emplacements qui rendront l'entretien plus facile pourront être trouvés dans certains cas.

4.2.10.2 Intensité des précipitations

On peut bien entendu mesurer l'intensité des précipitations avec un pluviomètre enregistreur. On a cherché à faciliter l'estimation visuelle de ce paramètre en établissant un lien avec la visibilité. Ce lien existe lorsque l'intensité de précipitation est faible à modérée et provient d'un nuage plus ou moins continu. Dans d'autres cas, par exemple en présence d'une averse, aucune corrélation fiable n'a pu être établie. Même dans les conditions les plus favorables, il faut savoir qu'il est difficile d'estimer la visibilité en mer de manière assez précise pour évaluer correctement l'intensité des précipitations.

4.2.11 Température de la mer en surface

La température qui doit être mesurée est celle de la surface de la mer qui doit être représentative des conditions présentes dans la couche de mélange située sous la pellicule superficielle.

Cette variable doit être mesurée avec grand soin, car elle sert entre autres à calculer l'écart avec la température de l'air, lequel détermine la stratification de la température, de l'humidité et d'autres propriétés des basses couches des masses d'air maritime. C'est pourquoi les thermomètres utilisés doivent présenter une résolution de 0,1 °C.

Il n'a pas été possible d'adopter un instrument standard pour mesurer la température de la mer en surface en raison de la taille et de la vitesse très variables des navires ainsi que des facteurs de coût, de fonctionnement et d'entretien.

La température de la mer en surface peut être déterminée par :

- a) Prélèvement d'un échantillon d'eau à la surface de la mer au moyen d'un seau spécial ;
- b) Lecture de la température de l'eau d'une prise d'eau ;
- c) Exposition d'un thermomètre électrique à la

- température de l'eau de mer, par immersion ou à travers la coque (par ex. en utilisant un capteur interne en contact avec la coque) ;
- d) Utilisation d'un radiomètre infrarouge orienté vers la surface de la mer.

Les deux premières méthodes sont les plus courantes depuis très longtemps. La comparaison des valeurs ainsi obtenues (OMM (1972)) a révélé que les températures au niveau des prises d'eau étaient supérieures en moyenne de 0,3 °C aux températures de l'eau prélevée dans des seaux. Depuis quelques années, avec l'augmentation de la vitesse et de la hauteur des navires, la troisième méthode est davantage utilisée. C'est celle qui donne les résultats les plus fiables. L'emploi de radiomètres n'est pas fréquent. La technique de la prise d'eau est la moins recommandée à cause des nombreuses précautions à prendre pour obtenir de bons résultats.

4.2.11.1 Seaux de prélèvement d'eau de mer

Un seau est descendu le long du flanc du navire pour prélever un échantillon d'eau de mer. Le seau est remonté à bord et la température de l'eau est mesurée avec un thermomètre. L'échantillon est prélevé du côté sous le vent, bien à l'avant de tout orifice de décharge. Il faut procéder à la lecture le plus rapidement possible après que le thermomètre se soit stabilisé, en veillant à ne pas l'exposer à la lumière directe du soleil. Quand on ne l'utilise pas, le seau est suspendu à l'ombre pour sécher.

Il est important qu'il soit conçu de telle manière que l'eau circule librement à l'intérieur pendant le prélèvement et que l'échange thermique dû au rayonnement et à l'évaporation soit le plus faible possible. Le thermomètre employé doit indiquer rapidement la température de l'eau, être facile à lire et, si possible, être fixé à demeure dans le seau. S'il faut le retirer pour effectuer la lecture, sa capacité calorifique doit être faible et son réservoir doit tremper dans une cuvette de taille suffisante pour que la température de l'eau extraite avec l'instrument ne varie pas notablement pendant l'opération. Le modèle de seau doit être jugé acceptable par l'organisme qui recrute le navire pour effectuer les observations.

Les mesures obtenues en prélevant de l'eau de mer dans des seaux bien conçus (et pas de simples seaux en toile ou autre matériau) sont en général assez fiables dans des conditions très différentes. Cependant, cette méthode est moins pratique que l'utilisation d'instruments fixés au navire car les conditions météorologiques, la taille ou la vitesse du navire empêchent parfois d'effectuer les mesures.

4.2.11.2 Thermomètres installés sur les prises d'eau ou les réservoirs

Le thermomètre placé dans les conduites de prise d'eau lors de la construction d'un navire ne convient en principe pas à la mesure de la température superficielle de la mer. Dans l'idéal, l'organisme qui recrute le navire devrait donc demander, avec l'accord de la société de transport maritime, qu'un thermomètre soit installé, de préférence dans un tube spécial assurant une bonne conduction thermique et placé à proximité de la prise d'eau.

Si un thermomètre à lecture directe est monté dans un endroit difficile d'accès, l'observateur doit corriger l'éventuelle erreur de parallaxe. Ce problème peut être résolu en installant un dispositif de lecture à distance (par exemple dans la salle des machines ou sur le pont). L'observateur doit aussi savoir que, sur les navires à fort tirant d'eau ou lorsqu'un fort gradient de température existe à l'intérieur de la couche superficielle de la mer, la température dans les prises d'eau est souvent très éloignée des valeurs réelles à la surface de la mer et varie selon le lest dont est chargé le navire. Enfin, la mesure ne doit bien sûr pas être effectuée lorsque le navire est à l'arrêt, car l'eau de refroidissement ne circule alors pas. Il est à noter que l'installation d'un capteur dans la prise d'eau ou d'un capteur de température de surface de la mer par contact de coque est souvent longue et compliquée, ce qui oblige les agents météorologiques de port ou les techniciens à travailler dans des conditions difficiles (intérieur du navire, zone d'accès restreint, etc...).

La température de l'eau peut être mesurée dans le caisson de prise d'eau situé au fond du navire, où aboutissent généralement les conduites des entrées d'eau. C'est un très bon emplacement pour installer un thermomètre à lecture distante. Les mêmes restrictions que celles déjà mentionnées s'appliquent à ce genre d'installation.

Bien que la majorité des thermomètres n'indiquent que la température instantanée, certains navires peuvent être équipés de capteurs de température susceptibles d'échantillonner les mesures avec une fréquence donnée et d'en faire la moyenne sur un certain temps. Dans ce cas, et pour produire les mesures les plus représentatives de la température de la mer en surface, on peut faire appel à un algorithme de filtrage modal qui exclura les valeurs extrêmes de la moyenne calculée.

4.2.11.3 Thermomètres fixés à la coque

C'est un moyen très pratique et très précis de mesurer la température superficielle de la mer. Il faut bien sûr employer des instruments à lecture distante. Le capteur est fixé soit à l'extérieur, en contact direct

avec l'eau, au moyen d'un raccord qui traverse la coque, soit à l'intérieur de la coque (le modèle «à ventouse»), sauf s'il s'agit d'une coque double. Ces deux dispositifs donnent des valeurs très concordantes, le premier réagissant de manière légèrement plus rapide aux variations de température.

Le capteur doit être placé à l'avant de tout point de décharge, à un ou deux mètres sous la ligne de flottaison. Si de fortes variations du tirant d'eau sont susceptibles de se produire, il est parfois nécessaire d'installer plusieurs capteurs. La mise en place et le câblage peuvent poser beaucoup de problèmes et il est préférable de procéder à ces opérations lors de la construction du navire. Si des capteurs doivent être ajoutés après la construction, les modèles à ventouse peuvent être posés sans mettre le bateau en cale sèche.

4.2.11.4 Thermomètres traînés

Plusieurs moyens de traîner un thermomètre à lecture distante dans la mer, là où serait prélevé l'échantillon d'eau de mer au moyen d'un seau ont été mises au point. Ces techniques se différencient par le câble de raccordement utilisé et par la façon d'exposer le capteur dans la mer.

Le câble doit supporter la traction du capteur et l'étirement qui peut en résulter tout en assurant un bon raccordement électrique. L'un des plus anciens modèles était un gros cordage de nylon tressé, à l'intérieur duquel passait un fil téléphonique à deux conducteurs présentant une grande résistance à la traction. Un autre modèle est formé d'un tuyau d'arrosage en PVC dans lequel est inséré un câble à deux conducteurs.

En ce qui concerne l'exposition du capteur, on utilise parfois un petit seau rempli de crin caoutchouté non tassé afin de protéger l'instrument des chocs et des vibrations. Le seau n'a pas à être immergé constamment. L'eau s'écoule lentement par deux petits orifices. Comme le seau se vide en huit secondes environ, le mouvement périodique des vagues de deux ou trois secondes, n'a pas d'effet sur les températures indiquées.

Dans un autre système, l'exposition et la protection du capteur sont assurées par le tuyau lui-même, sans utiliser de seau. Le tuyau, d'un diamètre intérieur de 12 mm, est percé dans ses deux ou trois derniers mètres de trous de 8 mm. L'extrémité est bouchée, avec seulement un petit orifice d'évacuation. Une longueur de corde y est fixée pour stabiliser l'instrument et lui permettre de glisser sans à-coups à la surface de la mer pendant que l'eau pénètre dans le tuyau et s'écoule en passant sur le capteur.

Ces appareils sont simples à utiliser et les mesures relevées sont très proches de celles obtenues avec des seaux de prélèvement d'eau de mer. Toutefois, comme ils sont employés depuis peu, on ne dispose d'aucune information sur leur engorgement éventuel par des salissures, etc. Il est donc possible qu'il faille mettre le tuyau à la mer et le remonter à chaque mesure, comme dans le cas des seaux.

4.2.11.5 Radiomètres

Toute matière dégage une certaine chaleur par rayonnement infrarouge du fait de sa température. La quantité d'énergie émise et la longueur d'onde du rayonnement dépendent de la température du corps et de son émissivité. Par conséquent, les radiomètres sensibles au rayonnement infrarouge peuvent servir à mesurer la température de la mer. Quand on oriente un tel appareil vers la surface de l'océan, il ne mesure la température que dans la couche la plus superficielle, une pellicule d'un millimètre environ, car l'émissivité de l'eau est proche de l'unité. D'importants gradients de température peuvent exister dans les premiers centimètres, surtout par temps relativement calme, les valeurs les plus basses se trouvant en haut.

Les radiomètres peuvent être tenus à la main (orientés vers l'avant et vers le bas), fixés à l'avant du navire ou sur un tangon qui surplombe la mer ou encore transportés par un aéronef ou un satellite. La valeur obtenue n'est généralement pas la température superficielle de la mer telle que cette variable a été définie plus haut, mais plutôt la température d'évaporation de la surface. Seuls quelques navires en sont équipés.

4.2.12 Vagues

On trouvera dans cette partie la définition des vagues, la description de leur comportement et les méthodes visuelles d'observation employées. Les techniques automatisées sont abordées brièvement dans la section 4.3 sur les bouées ancrées, mais elles s'appliquent aussi à d'autres plates-formes.

4.2.12.1 Définitions et descriptions des vagues

- *Fetch* : Distance le long d'une grande trajectoire à la surface de l'eau sur laquelle souffle un vent de direction et de vitesse presque uniformes.
- *Mer du vent* : Vagues générées par le vent soufflant au voisinage immédiat d'un site d'observation au moment de l'observation.
- *Houle* : Système de vagues ayant quitté sa zone d'origine (ou observé lorsque le champ de vent qui a produit les vagues n'existe plus).

- *Longueur d'onde des vagues* : Distance horizontale entre deux crêtes ou deux creux successifs, qui correspond à la période des vagues multipliée par leur vitesse.
- *Hauteur des vagues* : Distance verticale entre une crête et un creux.
- *Période des vagues* : Intervalle de temps écoulé entre le passage de deux crêtes successives en un point fixe. Cet intervalle équivaut à la longueur d'onde des vagues divisée par leur vitesse.
- *Vitesse des vagues* : Distance parcourue par une vague en un temps donné, égale à sa longueur d'onde divisée par sa période.

L'observation doit comporter la mesure ou l'évaluation des paramètres suivants pour chaque type de système de vagues, principalement la mer du vent et la houle primaire et secondaire.

- a) La direction (origine des vagues) sur une échelle 01-36, comme pour la direction du vent ;
- b) La période en secondes ;
- c) La hauteur.

Il est recommandé de suivre les méthodes d'observation des caractéristiques des vagues décrites ci-après.

Les vagues océaniques générées par le vent constituent de grands systèmes que l'on définit en fonction du champ de vent à l'origine des vagues ainsi que de la position relative du point d'observation. Étant donné la distinction établie entre la mer du vent et la houle, l'observateur doit être en mesure de reconnaître ces systèmes selon la direction, l'aspect et la période des vagues.

La figure 4.1 montre ce que l'on obtient habituellement avec un enregistreur de vagues. On voit la variation de la hauteur de la surface de la mer au-

dessus d'un point de référence fixe dans le temps, c'est-à-dire le mouvement oscillant d'un corps flottant à la surface de la mer, comme il est vu par l'observateur. C'est l'apparence normale de cette surface agitée par le vent pour former une houle.

Les vagues se propagent toujours en groupes irréguliers séparés par des zones plus calmes d'au moins deux longueurs d'onde. Cette irrégularité est plus marquée dans la mer du vent que dans la houle. Par ailleurs, et cela ne peut apparaître dans un enregistrement, des groupes d'au moins deux vagues bien formées peuvent suivre des directions variant de 20 à 30° les uns par rapport aux autres; il en résulte que les crêtes des vagues de la mer du vent sont plutôt courtes en raison des interférences créées par les vagues qui s'entrechoquent. Les vagues de la houle ont un aspect plus uniforme. Elles avancent de manière assez ordonnée dans une direction bien définie, leurs crêtes étant généralement longues et lisses. On peut observer des vagues de houle caractéristiques dans les zones où le vent n'a pas ou peu soufflé pendant plusieurs heures, voire pendant un ou plusieurs jours. La plupart du temps, la mer du vent et la houle sont mélangées.

4.2.12.2 Observations visuelles à partir de navires marchands

En tentant d'observer de façon distincte les caractéristiques de chaque système de vagues (mer du vent et houle), l'observateur devrait avoir conscience que les composantes les plus élevées de la mer du vent ressemblent à la houle de par leurs crêtes relativement longues et leur période importante. Il pourrait sembler possible de diviser l'ensemble des vagues de différentes hauteurs, périodes et directions (qui, ensemble, forment le système de la mer du vent) en deux systèmes différents de vagues et de considérer les petites vagues comme des vagues de la mer du vent et les grandes vagues comme des vagues de la houle, mais tel n'est pas nécessairement le cas.

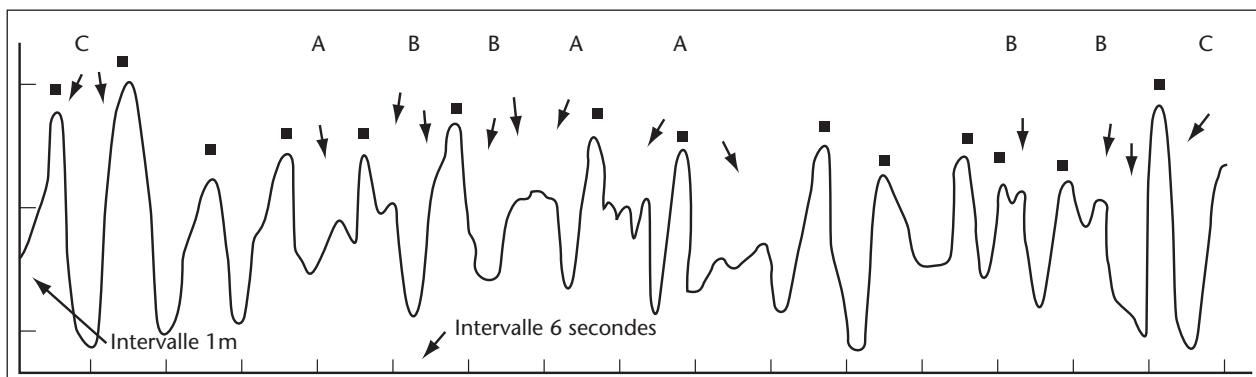


Figure 4.1. Vagues de la mer du vent et de la houle tracées par un enregistreur de hauteur des vagues

La distinction entre la mer du vent et la houle doit reposer sur l'un des critères suivants :

- *Direction des vagues* : Si la direction moyenne de toutes les vagues présentant plus ou moins les mêmes caractéristiques (en particulier la hauteur et la longueur d'onde) s'écarte d'au moins 30° de la direction moyenne des vagues d'un aspect différent (en particulier la hauteur et/ou la longueur d'onde), il faut considérer que les deux ensembles appartiennent à des systèmes distincts.
- *Aspect et période* : Si des vagues de houle typiques caractérisées par leur uniformité et par leurs longues crêtes se propagent à peu près dans la direction du vent – écart inférieur à 20° –, on doit les classer dans un système distinct si leur période dépasse d'au moins 4 s celle des grosses vagues de la mer du vent.

Pour mesurer la période et la hauteur moyenne d'un système de vagues, il ne faut tenir compte que des vagues types, c'est-à-dire des vagues les plus hautes situées au centre de chaque groupe de vagues bien formées (figure 4.1). On doit totalement omettre les vagues plates et mal formées (A) situées entre les groupes.

La période et la hauteur moyennes sont calculées sur environ 15 à 20 vagues bien constituées se trouvant au centre des groupes; ces vagues ne peuvent évidemment pas être consécutives. Les petites perturbations en forme d'ondulations (B) que l'on voit clairement se former sous l'action du vent au-dessus des grosses vagues doivent aussi être exclues des mesures.

On peut observer à l'occasion des vagues dont la hauteur est bien plus grande que les autres (C), seules ou en groupes de deux ou trois. Il ne faut pas considérer uniquement ces ondulations extrêmes. Pour mesurer correctement la période et la hauteur de 15 à 20 vagues environ, l'observateur doit inclure des groupes de vagues bien formées de hauteur moyenne. Par conséquent, la hauteur des vagues retenues sera inférieure à la hauteur maximale observée. En général, une vague sur dix excède la valeur ainsi déterminée. Il est courant de définir la hauteur type des vagues mesurée par des enregistreurs de hauteur des vagues comme étant la hauteur moyenne du tiers des vagues les plus hautes, cette valeur devant être approximativement égale à la hauteur des vagues évaluée par un observateur sans instruments.

L'observateur doit se rappeler que seules comptent les véritables mesures ou de très bonnes évaluations. Les approximations ont peu de valeur. En matière d'observation, la qualité prévaut sur la quantité. S'il n'est possible de mesurer que deux, voire un seul des

trois paramètres (direction, période, hauteur), pendant la nuit par exemple, les données présentent quand même un intérêt.

Ces considérations sont valables pour toutes les méthodes d'observation décrites ci-après. On trouvera des informations plus détaillées sur les vagues dans OMM (1998) et OMM (2001), section 4.4.1.

• *Direction des vagues*

Pour déterminer d'où proviennent les vagues, il suffit de suivre du regard les crêtes des vagues dans le sens de la longueur puis de pivoter de 90° vers les vagues qui s'approchent. On se trouve alors face à la direction recherchée.

• *Période des vagues*

C'est le seul paramètre que l'on peut vraiment mesurer à bord d'un navire marchand faisant route. Si l'on dispose d'un chronomètre, une seule personne peut effectuer l'observation; sinon, il faut être deux avec une montre à trotteuse. L'observateur localise d'abord un petit objet qui flotte sur l'eau à une certaine distance du navire; s'il n'y a rien en vue, il prend une tache d'écume qui demeurera visible pendant les quelques minutes nécessaires à l'observation. Le chronomètre est déclenché lorsque l'objet apparaît sur la crête d'une vague. La crête se déplace et l'objet disparaît dans un creux avant de revenir sur la crête suivante, et ainsi de suite. On note le temps chaque fois que l'objet atteint le sommet d'une crête. L'observation continue le plus longtemps possible, généralement jusqu'au moment où le point observé est trop éloigné, en raison du déplacement du navire. L'idéal pour prolonger au maximum la période d'observation est de choisir un objet qui se trouve au départ devant la proue du navire jusqu'à ce qu'il soit toujours visible.

Une autre méthode consiste à mesurer plusieurs périodes consécutives à l'intérieur d'un groupe donné de vagues, sans arrêter le chronomètre. On suspend l'observation après le passage de la dernière crête du groupe ou avant la disparition de l'objet. Le chronomètre est re-déclenché lors du passage de la première crête d'un nouveau groupe. L'observateur compte le nombre de périodes et met fin à l'observation lorsqu'il en a chronométré 15 ou 20 au moins.

On peut également faire des observations en scrutant le tangage et le roulis à la proue du navire. L'observateur prend le point le plus élevé ou le plus bas du cycle et commence à compter à partir de là. Lorsque ce point revient au même endroit, il note le temps écoulé. En répétant ce processus plusieurs fois, il peut obtenir une observation fiable. Il peut aussi procéder à des observations nocturnes, au cours desquelles il sent l'élévation et l'abaissement du navire avec son corps.

Les périodes inférieures à cinq secondes, dans des conditions de vent faible, se prêtent mal aux observations décrites ci-dessus, mais ces vagues présentent de toute façon moins d'intérêt que celles dont les périodes sont plus longues.

• Hauteur des vagues

Avec un peu d'expérience, il est possible de réaliser des évaluations assez fiables. Pour estimer la hauteur des vagues dont la longueur d'onde est beaucoup plus courte que le navire, l'observateur doit se placer le plus bas possible sur le bateau, de préférence à mi-longueur, où le tangage est moins fort, et du côté d'où provient l'ondulation. Il doit profiter des moments occasionnels où le roulis cesse.

Lorsque les vagues sont plus longues que le navire, on ne peut pas employer la méthode précédente, car tout le bâtiment est soulevé par l'ondulation. Pour obtenir de bons résultats, l'observateur monte ou descend sur le bateau jusqu'à ce que les vagues approchantes apparaissent juste au niveau de l'horizon, alors que le navire est dans un creux et droit par rapport à l'axe vertical (voir la figure 4.2). Dans ce cas, la hauteur des vagues est égale à la hauteur à laquelle se trouve l'observateur par rapport au niveau de l'eau sous lui (a). Lorsqu'il y a du roulis, il faut que la vague qui arrive coïncide avec l'horizon au moment où le navire est droit dans l'axe vertical, faute de quoi l'évaluation serait trop élevée (b).

Les conditions les plus difficiles sont de loin celles où la longueur d'onde dépasse la longueur du navire avec une hauteur de vagues faible. On effectue alors la meilleure mesure en se tenant le plus près possible de l'eau, mais l'estimation reste très approximative.

4.2.12.3 Observations à partir de navires météorologiques et d'autres navires spécifiques

Les navires météorologiques sont normalement dotés de tous les instruments nécessaires. Si l'on effectue toutefois des observations visuelles, il convient de suivre la méthode décrite plus haut et de mettre le navire dans l'axe où les vagues proviennent di-

rectement de l'avant. Pour mesurer les périodes, on peut jeter un objet sur le côté du navire. On doit peindre des marques (distantes d'un demi-mètre) sur le flanc du bateau, à mi-longueur.

La meilleure technique de mesure de la longueur d'onde consiste à mouiller une bouée à l'arrière du navire, à une distance telle que les crêtes de deux vagues successives passent simultanément sous la bouée et sous l'observateur. La distance séparant ces derniers correspond à la longueur d'onde.

On obtient la vitesse en notant le temps nécessaire pour qu'une vague passe de l'arrière du navire sous la bouée, et en tenant compte de la vitesse du bâtiment.

4.2.12.4 Vagues dans les eaux côtières

Voici d'autres définitions concernant la surface des eaux côtières :

Brisants : effondrement de vagues entières se propageant dans une eau très peu profonde, dont la profondeur correspond à peu près à deux fois la hauteur des vagues.

Ressac : état de la mer entre la côte et la ligne de brisants la plus éloignée.

Déferlement : effondrement partiel de la crête d'une vague produit par l'action du vent, l'escarpement des vagues dû à la présence d'un courant contraire (de marée ou autre), ou l'escarpement des vagues attribuable à l'arrivée sur des hauts-fonds trop profonds pour former des brisants.

Les observations faites à partir d'une station côtière ne peuvent être représentatives des conditions en haute mer, car, près du rivage, les vagues sont modifiées par la profondeur de l'eau, les marées et la réflexion contre des obstacles tels qu'escarpements rocheux et jetées. Par ailleurs, les eaux côtières peuvent être abritées par un cap ou, moins fréquemment, par des hauts-fonds, qui sont susceptibles d'influer sur la hauteur et la direction de propagation. La publication OMM (1991b) traite abondamment de ces phénomènes.

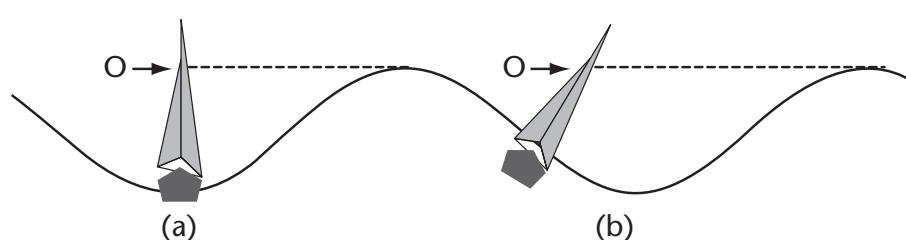


Figure 4.2. Effet du roulis sur l'évaluation de la hauteur des vagues

Si l'on effectue des observations malgré ces difficultés, il faut choisir les vagues de la même manière qu'en mer. Quand il s'agit de recherche sur les vagues, on doit indiquer la profondeur moyenne précise de l'eau au moment de l'observation ainsi que l'heure.

4.2.12.5 Terminologie relative aux vagues de la mer du vent et de la houle

On recommande l'emploi de la terminologie suivante, sauf dans les messages codés, pour la transmission de renseignements et de prévisions météorologiques destinés à la navigation maritime, à des publications, à l'aviation, etc. :

Longueur d'onde des vagues de la houle :

Courte	0 - 100 mètres
Moyenne	100 - 200 mètres
Longue	dépassant 200 mètres

Hauteur des vagues de la houle :

Faible	0 - 2 mètres
Moyenne	2 - 4 mètres
Élevée	dépassant 4 mètres

Hauteur des vagues de la mer du vent (état de la mer) :

Calme (sans rides)	0
Calme (ridée)	0 - 0,1 mètre
Belle (vaguelettes)	0,1 - 0,5 mètre
Peu agitée	0,5 - 1,25 mètre
Agitée	1,25 - 2,5 mètres
Forte	2,5 - 4 mètres
Très forte	4 - 6 mètres
Grosse	6 - 9 mètres
Très grosse	9 - 14 mètres
Énorme	dépassant 14 mètres

Dans tous les cas, lorsqu'une mesure tombe sur une valeur limite, elle doit être rattachée à la catégorie inférieure; par exemple une mer de quatre mètres est décrite comme forte. Quand aucun des termes ci-dessus ne décrit correctement l'état de la mer, il faut employer le qualificatif «confus».

4.2.13 Glace

On peut observer plusieurs formes de glace flottante en mer. La plus courante est produite par la congélation de l'eau à la surface, à savoir la glace de mer. Cette dernière est présentée dans OMM (1970).

Les autres formes sont la glace de cours d'eau et la glace d'origine terrestre. La glace de cours d'eau se trouve dans les ports et les estuaires, où elle est entraînée par les courants de marée et ne présente qu'un obstacle temporaire à la navigation. On traitera plus loin, dans un paragraphe distinct, des glaces d'origine terrestre ou icebergs.

Les icebergs et la glace de mer peuvent être dangereux pour le transport maritime et tous deux influent sur la navigation. La glace de mer modifie également les processus normaux d'échange d'énergie entre la mer et l'air. L'étendue de la couverture de glace, qui varie sensiblement d'une année à l'autre, a des effets marqués sur les zones océaniques adjacentes et sur les conditions climatiques de grandes régions du globe. Les météorologistes et les océanographes s'intéressent donc grandement à la répartition de cette couverture. Même si les observations à grande échelle ont complètement changé avec l'apparition de la photographie par satellite, on a encore recours à des stations côtières, à des navires et à des aéronefs afin de recueillir des données précises et de vérifier sur le terrain les observations satellitaires.

Pour le moment, les mesures concernant la glace flottante reposent presque entièrement sur des estimations visuelles. Les seuls observations instrumentales proviennent de radars classiques ou d'appareils plus récents, notamment les capteurs passifs à micro-ondes ou le radar aéroporté à balayage latéral. Comme les icebergs réfléchissent mal l'énergie radar, on ne peut pas toujours les détecter par ce moyen.

4.2.13.1 Observations du givrage

Le givrage peut être très dangereux en raison de ses effets sur les navires de petite taille, en particulier si leur jauge brute est inférieure à 1 000 tonneaux environ. Même sur les bâtiments plus importants, il peut provoquer des pannes de radio et de radar en raison du givrage des antennes. La visibilité depuis la passerelle peut aussi être affectée. Des problèmes se sont produits en raison du givrage de la cargaison située sur le pont de grands porte-conteneurs. Mis à part son effet possible sur la stabilité, le givrage peut rendre difficile le déchargement de la cargaison dans le port de destination si les conteneurs et leurs amarres sont gelés et adhèrent au pont. Les bateaux de pêche sont particulièrement sensibles au givrage. On trouvera de plus amples informations dans OMM (1991b), les aspects météorologiques de la question étant présentés en détail dans OMM (1974).

Il existe deux types principaux de givrage en mer : le givrage dû à l'eau de mer et le givrage dû à l'eau douce. Le givrage dû à l'eau de mer peut provenir des embruns et de l'eau projetés par l'interaction entre le navire ou l'installation et les vagues, des embruns soufflés depuis les crêtes des vagues, ou des deux. Le givrage dû à l'eau douce peut provenir de la pluie verglaçante et/ou de la bruine, ou, parfois, d'une chute de neige fondue suivie d'une baisse de température, ou il peut provenir d'un brouillard givrant. Les deux types de givrage peuvent se produire simultanément.

Les deux facteurs météorologiques les plus importants gouvernant le givrage en mer sont la vitesse du vent et la température de l'air. Plus la vitesse du vent relatif par rapport au navire est importante et plus la température est basse, plus le givrage est important. Il n'y a pas de température limite de l'air au-dessous de laquelle le risque de givrage diminue.

Le code de l'OMM (OMM (1995b)) utilisé pour les bulletins météorologiques radio émanant de navires en mer prévoit l'inclusion d'informations sur le givrage, soit en code soit en langage clair. La forme codée, groupe isolé de cinq chiffres, prévoit des informations sur la cause du givrage, l'épaisseur de la glace et le taux de givrage. Les messages en clair, qui doivent être précédés du mot ICING (givrage), sont particulièrement recommandés pour indiquer des caractéristiques du givrage dangereuses pour les navires.

4.2.13.2 Formation et développement de la glace de mer

• Glace de moins de 30 cm d'épaisseur

La formation de la glace commence par l'apparition de petites aiguilles ou plaques de glace dans les premiers centimètres de l'étendue d'eau. Ces aiguilles, appelées frasil, se multiplient et donnent à la mer un aspect huileux. Si le refroidissement se poursuit, le frasil s'accumule pour former du sorbet, d'apparence mate. Dans ces conditions proches de l'englacement mais toujours sans glace, la neige qui tombe à la surface de la mer produit une couche de neige fondue. Ces diverses formes peuvent s'amalgamer sous l'action du vent et des vagues, pour constituer du shuga; elles sont regroupées sous le terme de nouvelle glace. On voit ensuite apparaître de la glace vitrée ou du nilas, selon la vitesse de refroidissement et la salinité de l'eau. La glace vitrée se forme quand une eau de faible salinité gèle en une couche mince de glace cassante, presque exempte de sel. Quand il s'agit d'une eau très saline, que le processus est rapide et que le vent est très faible, on obtient une couche élastique caractéristique du nilas. Cette glace peut être sombre ou claire, selon son épaisseur; le nilas clair, plus ancien, peut atteindre une épaisseur de 10 cm.

Sous l'effet du vent et des vagues, la glace vitrée ou le nilas peut se fractionner en « crêpes de glace » susceptibles ultérieurement de geler et de s'épaissir pour donner de la glace grise et de la glace blanchâtre, cette dernière pouvant atteindre 30 cm d'épaisseur. Ces glaces sont regroupées sous le terme générique de jeune glace. Le mauvais temps peut les scinder en glaçons ou en plaques de glace de différentes tailles.

• Glace de 30 cm à 2 m d'épaisseur

L'étape suivante est la glace de première année, qui peut être mince, moyenne ou épaisse; la glace mince

de première année a une épaisseur qui se situe entre 30 et 70 cm, la glace moyenne entre 70 et 120 cm et la glace épaisse des régions polaires peut atteindre 2 m environ à la fin de l'hiver.

• Vieille glace

La glace épaisse de première année qui survit à une saison de fonte estivale est appelée vieille glace. Entrent dans cette catégorie la glace de deuxième année et la glace de plusieurs années, selon qu'elle a traversé un ou plusieurs étés. L'épaisseur de la vieille glace varie normalement de 1,2 à 3 m ou plus avant le début de la saison de fonte. Vers la fin de l'été, elle peut être nettement moins épaisse. Il est souvent possible de reconnaître la vieille glace à sa teinte bleutée en surface, tandis que la glace de première année présente une teinte verdâtre.

• Couverture de neige

La glace se recouvre généralement de neige en hiver, ce qui l'isole de l'air et tend à ralentir sa croissance. L'épaisseur de cette couverture varie considérablement d'une région à l'autre, selon les conditions climatiques. Elle varie aussi sur des courtes distances en raison des vents et de la topographie particulière de la glace.

• Décroissance de la glace de mer

Lorsque la glace est recouverte de neige, près de 90 % du rayonnement reçu est réfléchi vers l'espace. La neige peut toutefois commencer à fondre quand la température de l'air excède 0 °C, au début de l'été. L'eau douce qui en résulte forme des mares à la surface, qui absorbent environ 90 % du rayonnement et grossissent rapidement en faisant fondre la neige ou la glace environnante. Elles peuvent même transpercer la banquise et former ce qu'on appelle des trous de fonte. Ce lent processus de décroissance est propre à l'océan Arctique et aux mers dans lesquelles le mouvement des glaces est limité par des côtes ou des îles. Lorsque la glace peut dériver jusque dans des eaux plus chaudes (par exemple l'Antarctique, l'est du Groenland et la mer du Labrador), la décroissance est accélérée par l'érosion due aux vagues et par l'élévation de la température de l'air et de la mer.

• Déplacement de la glace de mer

On divise la glace de mer en deux catégories selon sa mobilité : la glace dérivante, qui se déplace en permanence sous l'effet du vent et des courants, et la banquise côtière, immobilisée le long de certaines côtes ou îles. Lorsque la concentration est élevée (au moins 7/10), la glace dérivante peut être appelée pack.

La tension du vent sur le pack fait déplacer les plaques à peu près dans la direction du vent. La force déviante liée à la rotation de la Terre (force de Co-

riolis) modifie la trajectoire de la glace d'à peu près 30° à droite de la direction du vent de surface dans l'hémisphère Nord. Comme le vent de surface est lui-même dévié d'autant mais dans la direction opposée par rapport au vent géostrophique (mesuré directement à partir des isobares), la direction de déplacement des plaques de glace, attribuable à la seule dérive due au vent, est considérée comme parallèle aux isobares.

La vitesse de déplacement varie non seulement en fonction de la vitesse du vent, mais aussi selon la concentration et la déformation (voir ci-après) de la glace. Quand la densité est faible (1/10 à 3/10) la glace peut réagir beaucoup plus au vent que lorsque la concentration est plus importante (7/10 - 8/10), qui comporte peu de vides. On estime la vitesse moyenne de dérive due au vent à 2 % de la vitesse du vent pour des glaces denses, mais des glaces moins denses peuvent se déplacer beaucoup plus vite. Les glaces dérivantes flottant à la surface sont également soumises aux courants présents dans les couches supérieures de l'eau, courants de marée ou courants présentant une direction plus constante en raison d'autres forces. Il est généralement très difficile de savoir si la glace est entraînée par les vents ou les courants, mais lorsque les deux facteurs sont présents, le déplacement résultant est toujours la somme vectorielle des deux. Normalement, c'est la tension du vent qui prévaut, en particulier au large des côtes.

• Déformation de la glace de mer

La surface de la glace se déforme sous l'effet des pressions. Quand il s'agit de nouvelle ou de jeune glace, cela peut donner lieu à un phénomène d'empilement, les plaques montant les uns sur les autres. Dans le cas d'une glace plus épaisse, on assiste à la formation de dorsales et de monticules, selon le type de forces convergentes à l'origine de la pression. Au cours de ce processus, lorsque les blocs s'entassent au-dessus du niveau général de la glace, de grandes quantités de glace s'enfoncent sous le poids des monticules. La taille partie immergée des dorsales peut correspondre à trois à cinq fois sa hauteur, ce qui présente de graves dangers pour le transport maritime. Il est généralement moins difficile de naviguer à proximité de dorsales récemment formées qu'entre des dorsales plus anciennes, qui sont consolidées et érodées.

4.2.13.3 Icebergs

Les icebergs sont de grandes masses de glace flottante qui se sont détachées de glaciers ou de plates-formes glacières. Leur profondeur sous l'eau par rapport à leur hauteur au-dessus du niveau de la mer varie grandement selon leur forme. La masse sous-marine d'un iceberg antarctique provenant d'une plate-

forme flottante est généralement moindre que celle d'un iceberg issu d'un glacier du Groenland. Pour un iceberg tabulaire antarctique typique, dont les 10 à 20 m supérieurs sont constitués de vieille neige, on estime que le rapport entre la partie émergée et la partie immergée est de un pour cinq, tandis que dans le cas d'un iceberg arctique, presque entièrement composé de glace et recouvert de beaucoup moins de neige, ce rapport est habituellement de un pour huit.

Les icebergs diminuent de taille par vêlage, fonte et érosion due aux vagues. On dit qu'un iceberg vêle quand il se fragmente. Ce phénomène perturbe son équilibre, ce qui risque de modifier son angle de dérive ou de le faire chavirer. Les icebergs présentent souvent de grandes projections sous-marines, parfois difficiles à observer. Dans les eaux froides, la fonte a principalement lieu au niveau de la ligne de flottaison. Dans les eaux chaudes, c'est par le dessous que survient ce phénomène et l'iceberg vêle fréquemment. Il est particulièrement dangereux de s'approcher d'un iceberg qui fond dans des eaux chaudes, car il est instable et peut se fragmenter ou se retourner à tout moment. Lorsqu'un iceberg se désagrège rapidement, il est souvent entouré de nombreux bourguignons et fragments d'icebergs, qui constituent un véritable péril pour la navigation.

Comme les icebergs ne réfléchissent pas bien l'énergie radar, il n'est pas toujours possible de les détecter de cette façon. Les bourguignons et les fragments d'icebergs sont encore plus difficiles à déceler à l'aide d'un radar à bord d'un navire, car ils sont souvent masqués par les échos fixes provenant des vagues et de la houle. Les petits fragments sont particulièrement dangereux pour la navigation en dépit de leur taille réduite, leur masse étant suffisante pour endommager un navire qui les heurterait à une vitesse de croisière normale. Certains bourguignons constitués de glace pure sont très difficiles à apercevoir, car ils dépassent à peine de la surface de la mer.

4.2.13.4 Observations de la glace de mer et des icebergs

Une bonne observation des glaces exige la connaissance de la nomenclature et une certaine expérience. Avec ses illustrations, la Nomenclature des glaces de mer de l'OMM (OMM (1970)) constitue le meilleur guide pour identifier les glaces.

Les quatre caractéristiques importantes pour la navigation sont :

- a) L'épaisseur : stade de formation (nouvelle glace, jeune glace, glace de première année, vieille glace et leurs sous-catégories) ;
- b) La quantité : concentration (en dixièmes de la surface de la mer couverte de glace) ;

- c) La forme de la glace, qu'il s'agisse d'une banquise côtière ou de glaces dérivante, et la taille des plaques qui la constituent ;
- d) Le déplacement, notamment en ce qui a trait à ses effets sur la déformation.

Comme les icebergs représentent une véritable menace pour la navigation, en particulier la nuit ou dans des conditions de faible visibilité, il est important de signaler aussi le nombre d'icebergs en vue au moment de l'observation, en particulier dans les eaux où ils sont moins fréquents.

Les observations de glace de mer peuvent être transmises en langage clair ou en code. L'OMM a adopté deux codes internationaux pour la glace de mer. Le plus simple est le groupe ICE ajouté à la forme symbolique SHIP. Le code ICEAN a été mis au point à l'intention des spécialistes pour la transmission d'analyses et de prévisions concernant la glace de mer.

Voici les deux règles de base à respecter lors des observations effectuées à partir de navires et de stations côtières :

- a) Obtenir un champ de vision étendu en se positionnant le plus haut possible au-dessus de la surface de la mer (sommet d'un phare, passerelle ou nid de pie d'un navire, etc.) ;
- b) Établir l'état des glaces en mer en deçà d'un rayon n'excédant pas la moitié de la distance séparant le point d'observation de l'horizon.

L'OMM a élaboré une série de symboles pour les cartes de l'état actuel et prévu des glaces de mer. Ces symboles sont destinés à l'échange international de renseignements et à la transmission par radio facsimilé de données sur les glaces.

4.2.14 **Observations de phénomènes spéciaux**

Lorsqu'on signale une trombe marine, il faut toujours donner le sens de rotation tel qu'il apparaîtrait depuis le sommet du tourbillon.

4.2.15 **Flotte de navires d'observation bénévoles**

La première étape dans le recrutement de navires d'observation bénévoles consiste à obtenir l'autorisation des propriétaires et du capitaine du navire. Après cette formalité et la désignation du navire, les agents météorologiques des ports doivent :

- a) Installer des instruments étalonnés dans les lieux les plus adaptés ;
- b) Fournir des formulaires ou installer le logiciel de saisie d'observation ;

- c) Former des observateurs à l'entretien et au fonctionnement des instruments ;
- d) Former des observateurs à tous les aspects des pratiques en matière d'observation ;
- e) Faire la démonstration de l'emploi du logiciel de saisie et du report des observations ;
- f) Noter les métadonnées voulues concernant le navire (sous la forme actuelle présentée dans la publication OMM-N° 47) ;
- g) Faire la démonstration de méthodes de transmission des observations ;
- h) Expliquer les produits de prévision maritime du SMN.

Une fois le navire recruté, dans l'idéal, l'agent météorologique devrait monter à bord au moins tous les trois mois (sous réserve des déplacements du navire et des ressources en personnel; si cela n'est pas faisable, on peut envisager des visites annuelles) afin de vérifier l'exactitude des instruments et de renouveler l'approvisionnement en formulaires, documents, etc. Cette visite est aussi l'occasion de stimuler l'intérêt pour la météorologie et d'expliquer l'utilité de la collecte de renseignements précis, tant pour les gens de mer que pour les météorologistes.

Les stations météorologiques automatiques et les capteurs numériques permettent d'espacer les visites jusqu'à un an.

On trouvera toutes les informations voulues sur le Programme des navires d'observation bénévoles de l'OMM dans OMM.(2001).

4.2.16 **Autres observations bénévoles ne relevant pas du Programme des navires d'observation bénévoles**

Dans certains cas, une entreprise (généralement de pétrole ou de gaz) qui exploite un navire ou une plate-forme procède à des observations et/ou à des mesures pour son propre compte et les diffuse sur le SMT sans la participation d'un agent météorologique de port. Normalement, l'installation et l'entretien du matériel météorologique océanique et la formation à son propos devraient se faire sous contrat. Si le navire ou la station n'a pas été recruté par un agent météorologique de port, il faudrait faire en sorte que les métadonnées pertinentes soient aussi diffusées par les voies appropriées de l'OMM.

4.3 **BOUÉES ANCRÉES**

Les bouées ancrées présentent une large variété de configurations (en terme de système d'ancrage, de types de capteurs, de procédés d'échantillonnage,

de techniques de montage, de télémétrie, etc.) servant à différentes sortes d'applications opérationnelles et de recherche et à diverses disciplines. Cette section, qui n'indique pas les nombreuses possibilités exploitées dans les systèmes actuels, porte sur les conditions des mesures météorologiques maritimes effectuées par des bouées météorologiques ancrées opérationnelles. On trouvera dans d'autres publications et sur certains sites Web des informations concernant d'autres systèmes correspondant aux besoins des applications en matière de recherche :

- ATLAS : http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/mooring.shtml
- Stations climatiques océaniques : <http://www.pmel.noaa.gov/OCS/>
- Bouées ancrées tropicales du Pacifique Ouest TRITON : http://www.jamstec.go.jp/jamstec/TRITON/real_time/php/top.php
- Bouées ancrées récentes de l'océan Indien m-TRITON : <http://www.jamstec.go.jp/iorgc/iomics/index.html>
- Guide OCSA pour réaliser des mesures météorologiques et des mesures des flux en ce qui concerne la qualité en mer (Bradley et al., 2007).

Les bouées ancrées en haute mer sont généralement équipées de capteurs permettant de mesurer les éléments suivants :

- a) La vitesse du vent ;
- b) La direction du vent ;
- c) La pression atmosphérique ;
- d) La température de la mer en surface ;
- e) La hauteur et la période des vagues ;
- f) La température de l'air ;
- g) La température du point de rosée ou l'humidité relative.

Certaines bouées peuvent aussi mesurer d'autres caractéristiques :

- a) Les rafales maximales ;
- b) Les spectres des vagues (directionnels ou non) ;
- c) Le rayonnement solaire (rayonnement descendant de courte longueur d'onde) ;
- d) Les courants de surface ou les profils des courants ;
- e) La salinité de surface ;
- f) La température et la salinité sous la surface jusqu'à 500 ou 750 m de profondeur ;
- g) La visibilité atmosphérique ;
- h) Les précipitations ;
- i) La concentration de CO₂ en surface.

Pour les vagues, on mesure ou l'on évalue généralement les variables suivantes en utilisant les définitions ci-après (voir aussi le paragraphe 4.2.12.1 pour compléter ces définitions) :

Hauteur significative des vagues : évaluation de la hauteur moyenne du tiers des vagues les plus hautes ;

Hauteur maximale des vagues : hauteur maximale des vagues observées pendant un temps déterminé.

Période moyenne des vagues qui passent par la valeur zéro : période des vagues correspondant au passage par la valeur zéro de la hauteur en surface, qu'on peut évaluer à partir du moment du deuxième ordre de la fréquence du spectre d'énergie des vagues.

Hauteur de crête : hauteur des vagues correspondant au maximum du spectre d'énergie des vagues (partie du spectre ayant l'énergie la plus élevée).

Période de crête : période des vagues correspondant à la hauteur maximale du spectre d'énergie des vagues.

Période du spectre des vagues : période des vagues correspondant à la fréquence moyenne du spectre.

Il convient en plus d'effectuer des mesures météorologiques et océaniques, de contrôler la position des bouées et divers paramètres généraux pour favoriser le contrôle qualité des données et la maintenance des systèmes. La technologie des bouées ancrées s'est améliorée au point qu'on peut compter sur une exploitation sans intervention pendant six mois à deux ans, même dans les conditions les plus rigoureuses. Leur durée de vie opérationnelle est largement déterminée par la durée de vie des capteurs, que souvent l'on change à intervalles de 12 à 18 mois.

Désormais, on considère que les observations émanant de bouées ancrées sont de meilleure qualité que celles émanant de navires du point de vue de l'exactitude et de la fiabilité des mesures (Wilkerson et Earle (1990); Ingleby (2010)). En effet, les bouées ancrées sont généralement considérées comme produisant les observations de la plus haute qualité d'une vaste gamme de variables météorologiques maritimes et, outre leur utilisation par des prévisionnistes et leur assimilation dans des modèles de prévision numérique du temps, elles fournissent également des informations sur la climatologie des zones océaniques, des données de terrain de référence pour la calibrage et/ou la validation des satellites et des évaluations des flux de surface (par ex. Bourras (2006)).

Les incertitudes caractéristiques des mesures émanant de bouées opérationnelles sont les suivantes :

Vitesse du vent	1 m s ⁻¹ ou 5 % au-dessus de 20 m s ⁻¹
Direction du vent	10°
Température de l'air	0,2 °C
Pression au niveau de la mer	0,2 hPa
Température de la mer en surface	0,2 °C
Température du point de rosée	0,5 °C
Hauteur significative des vagues	10 % ou 0,2 m
Direction des vagues	10°
Période des vagues	1 s

L'ensemble standard de capteurs montés sur les bouées ancrées mesure la vitesse du vent, les rafales maximales (par ex. les rafales sur 3 à 5 s selon les prescriptions nationales), la direction du vent, la pression barométrique, la température de l'air, la température de l'eau et les spectres non directionnels d'énergie des vagues océaniques, à partir desquels on détermine la hauteur significative des vagues et leur période maximale (ou moyenne). Pour les tsunamètres, la mesure standard est la hauteur de la colonne d'eau.

4.3.1 Pression atmosphérique

La pression atmosphérique et sa variabilité dans le temps et l'espace sont essentielles pour la prévision numérique et l'analyse du temps. La plupart des bouées mesurent la pression atmosphérique au moyen de baromètres anéroïdes numériques. La pression est déterminée à partir de la capacité électrique entre des plaques parallèles sensibles à la pression. La capacité entre les plaques augmente avec la pression. Les mesures de pression ci-après sont réalisées :

- La pression de la station est en fait la mesure réalisée par le baromètre à l'altitude de la station, exprimée en hectopascals (hPa). Dans certains cas, on peut utiliser deux baromètres et établir la moyenne des valeurs qu'ils indiquent.
- La pression au niveau de la mer est la pression réduite au niveau de la mer à partir de la pression au niveau de la station, en hPa. Pour les bouées déployées en mer, cette valeur est très proche de la pression au niveau de la station. On observe une grande différence entre la pression au niveau de la mer et la pression au niveau de la station déterminée par des bouées déployées sur des lacs de haute altitude. On convertit la pression au niveau de la station en pression au niveau de la mer au moyen des procédures décrites dans WBAN (1964) et WBAN (1963).

De nombreuses bouées déployées dans des zones sensibles aux cyclones ou à de fortes dépressions sont à même de mesurer des données de pression moyenne sur une minute. Ces données sont enregistrées lorsque les données horaires de pression passent sous un seuil prédéterminé (par ex. 1008 hPa dans les tropiques). Les conditions de production de données supplémentaires sur la pression sont les suivantes :

- La pression barométrique relevée sur au moins une minute émanant du baromètre primaire (et du baromètre secondaire s'il en existe un), exprimée en hPa, est la pression barométrique moyenne minimale sur une minute pour l'heure entière.
- L'heure est la minute de l'heure où la pression minimale s'est produite.

4.3.2 Mesure du vent

La mesure du vent est l'une des mesures les plus importantes effectuées par les bouées ancrées. Elle est indispensable aux prévisionnistes de la météorologie marine.

Définitions :

- La direction du vent est la direction d'où souffle le vent, exprimée en degrés dans le sens horaire à partir du nord vrai. Il s'agit de la moyenne vectorielle du relevé de la direction du vent.
- La vitesse du vent est la moyenne scalaire de cette vitesse sur l'intervalle d'échantillonnage (habituellement 10 minutes).
- La vitesse maximale du vent est la vitesse la plus élevée du vent notée dans les relevés. Les rafales sont déterminées à partir de la moyenne glissante des relevés sur un intervalle court (par ex. 5 s).

Le vent est généralement mesuré par un anémomètre à hélice (États-Unis et Canada, par ex.) ou par un anémomètre à coupelles et une girouette (Royaume-Uni, Irlande, France). Pour éviter l'usure mécanique, on commence à utiliser dans les bouées ancrées des capteurs de vitesse et de direction du vent à ultrasons, sans pièces mobiles. Normalement, on associe la mesure de la direction du vent à celle provenant d'un compas afin de pouvoir corriger la direction relative du vent pour en obtenir la direction vraie.

Aux États-Unis et au Canada, on utilise généralement sur les bouées ancrées une girouette à quatre pales reliées à un rotor. Les mesures finales sont des évaluations statistiques du vent issues d'une série chronologique d'échantillons de vent instantané recueillis à une fréquence minimale de 1 Hz sur une durée déterminée. Le taux d'échantillonnage est fonction de la capacité de traitement. Dans la plupart des bouées ancrées, on utilise une période d'acquisition de 8 minutes. Ces mesures standard de vent sont effectuées toutes les heures.

Chez certains Membres (comme les États-Unis et le Canada), les bouées météorologiques ancrées procèdent à un traitement statistique à la fin de la période d'acquisition et le message de sortie est actualisé par les nouvelles données et les données de 6 périodes de 10 minutes. Le traitement statistique inclut le calcul de la direction et de la vitesse moyennes et l'écart type de la vitesse. Les données horaires ne représentent pas les données de la minute 0 à la minute 59, mais les six derniers segments complets de 10 minutes avant la fin de la dernière acquisition. Toutefois, les segments de 10 minutes sont limités par les minutes 0, 10, 20, etc.

Sur les bouées ancrées américaines et canadiennes, la vitesse du vent à 10 m et 20 m au-dessus du site est déduite d'un algorithme (Liu et al., 1979) faisant intervenir la hauteur de l'anémomètre, la vitesse du vent, une humidité relative constante de 85 %, une pression constante au niveau de la mer de 1013,25 et la température de l'air et de l'eau. Si la température de l'air ou celle de l'eau n'est pas disponible, on suppose qu'elles sont égales. Cette hypothèse peut introduire une erreur allant jusqu'à 5 %. Si les deux variables sont manquantes, les vitesses de vent à 10 et 20 m ne sont pas calculées. Traditionnellement, sur les bouées ancrées britanniques, françaises et irlandaises de la série K, on fait appel à un anémomètre à coupelles et à une girouette indépendante pour mesurer la vitesse et la direction du vent sur une période d'acquisition de 10 minutes par heure. Toutefois, en cours de fonctionnement, de l'eau salée s'infiltra dans les joints et, à terme, les instruments tombent en panne lorsque des cristaux de sel se forment dans le lubrifiant, ce qui entraîne un blocage des pièces mobiles. Ces bouées disposent d'un système doublé pour augmenter la résilience d'un anémomètre en cas de panne. Pour en accroître encore la fiabilité, les Britanniques remplacent ces anémomètres par un nouveau système faisant appel à des anémomètres soniques et à des compas électroniques.

4.3.3 Température

La température est l'une des mesures de base de la météorologie. On fait généralement appel à des thermistances électroniques pour effectuer toutes les mesures de température, exprimées en degrés Celsius (°C). Ces mesures permettent également de déduire la pression au niveau de la mer de la pression atmosphérique à une altitude non standard et la vitesse du vent à une altitude standard d'une mesure à une altitude non standard.

4.3.3.1 Température de l'air

En général, la mesure de la température de l'air est très fiable. Il est à noter cependant que la position physique des capteurs de température risque d'affecter les mesures. Les emplacements des thermomètres peuvent entraîner des relevés non représentatifs en cas de vent faible. La température de l'air est acquise à une fréquence déterminée pendant la période d'acquisition (aux États-Unis et au Canada, par exemple, on utilise une fréquence de 1 Hz, et en France, au Royaume-Uni et en Irlande, une fréquence de 0,1 Hz, sur une période d'échantillonnage de 10 s.)

4.3.3.2 Température de l'eau

Si la mesure de la température de l'eau pose en général peu de problèmes, il est à noter que la profondeur des capteurs varie selon la coque des bouées et que les capteurs de température des bouées sont fixés à

l'intérieur de leur coque. Comme ces coques sont de bons conducteurs thermiques, les températures mesurées correspondent à la température moyenne de l'eau avoisinant la coque immergée et non pas à la température de l'eau proche du capteur. Dans une eau hautement stratifiée, surtout l'après-midi et par vent calme, la température relevée par une bouée peut être inférieure de 2 à 3 °C à la température pelliculaire de l'eau.

4.3.4 Évaluation des vagues océaniques

L'évaluation de l'état de la mer est sans doute la mesure la plus complexe effectuée à partir de bouées ancrées. Elle est très importante pour les prévisionnistes marines, les marins, les océanographes et autres scientifiques. Sur une bouée, toutes les mesures de base concernant les vagues sont déduites d'une certaine façon de la série chronologique des mouvements des bouées³. Le National Data Buoy Center (NDBC) américain donne des informations détaillées sur la mesure des vagues qu'ils effectuent (NDBC (2003)).

Ce qu'on appelle «état de la mer» est une description des propriétés des vagues océaniques à un moment et à un endroit donné. Il peut être représenté par le spectre des vagues ou, plus simplement, la hauteur significative des vagues et une mesure de leur période (AMS (2000)). De nombreuses bouées ancrées fournissent la mesure de la densité de la variance spectrale (AIRH, List of Sea State Parameters), qu'on appelle densité spectrale des vagues. La plupart des bouées obtiennent l'ensemble des paramètres non directionnels des vagues, hauteurs, périodes, pente, etc. à partir de cette densité spectrale. En outre, de nombreuses bouées mesurent le spectre directionnel des vagues, dont elles déduisent la direction moyenne et principale des vagues et les premières et deuxièmes coordonnées polaires normalisées à partir des coefficients de Fourier, que les centres diffusent au moyen des codes alphanumériques FM-65 WAVEOB de l'OMM (OMM (1995)).

4.3.5 Évaluation du spectre non directionnel des vagues

Dans la plupart des bouées, on fait appel à des accéléromètres pour en mesurer son élévation. Les accéléromètres, montés de façon à rester verticaux par rapport à la coque ou stabilisés parallèlement à la verticale de la Terre, sont utilisés dans les bouées et effectuent la grande majorité des mesures des vagues. La stabilisation verticale, lorsqu'on y fait ap-

³ Le NDBC n'effectue plus de mesures des vagues au moyen de détecteurs laser de la hauteur des vagues dans les stations C-MAN.

pel, est obtenue au moyen d'un capteur de houle, de tangage et de roulis dont le plan de référence est monté sur une plate-forme stabilisée par gravité et indique une période naturelle de l'ordre de 40 secondes. Ce type de matériel, qui est onéreux, possède un système mécanique intégré permettant de garder l'accéléromètre à la verticale lorsque la bouée et le capteur s'inclinent.

Des systèmes opérationnels non directionnels de mesure des vagues donnent des évaluations de l'accélération ou des spectres de déplacement. S'ils ne sont pas indiqués directement, les spectres de déplacement sont déduits des spectres d'accélération dans le cadre des calculs nécessaires pour le traitement à terre des données sur les vagues. À partir de ces spectres, on calcule la période moyenne des vagues, leur période dominante, leur hauteur significative et leur pente. Ces paramètres non directionnels des vagues se définissent ainsi :

- La période moyenne des vagues, exprimée en secondes, peut être calculée de diverses façons. Elle peut correspondre à la fréquence des vagues, qui divise leur spectre en zones égales, ou elle peut être fondée sur le moment du deuxième ordre de la fréquence de la densité spectrale non directionnelle. On peut aussi l'évaluer grâce à une méthode de passage par la valeur zéro.
- La période dominante ou la période de crêtes des vagues, exprimée en secondes, est la période correspondant à la fréquence centrale de la bande de fréquences avec une densité spectrale non directionnelle maximale.
- La hauteur significative des vagues, H_{m0} , est évaluée à partir de la variance du déplacement des vagues déduite du spectre de déplacement selon l'équation suivante :

$$H_{m0} = 4 \left[\int_{f_l}^{f_u} S(f) df \right]^{\frac{1}{2}}$$

où :

$S(f)$ désigne la densité spectrale de déplacement,
 df la largeur de la bande de fréquences,
 f_u la limite supérieure de fréquences,
 f_l la limite inférieure de fréquences.

4.3.6 Évaluation du spectre directionnel des vagues

Les systèmes directionnels de mesure des vagues exigent, outre la mesure de l'accélération verticale ou l'élévation (déplacement), l'azimut de la bouée, le tangage et le roulis. Ces paramètres permettent de calculer la pente est-ouest et la pente nord-sud. Dans la plupart des bouées, on utilise diverses méthodes et divers ensembles de capteurs pour mesurer ces angles.

Il est recommandé (Swail et al. (2010)), pour être utile à l'ensemble des utilisateurs, de faire en sorte que les systèmes de mesure du spectre directionnel des vagues permettent d'évaluer cinq variables (the «First 5») de façon fiable. Techniquelement, il s'agit de cinq variables définies pour une fréquence (ou période) donnée des vagues. La première variable est l'énergie des vagues, qui est liée à leur hauteur, et les quatre autres sont les quatre premiers coefficients de la série de Fourier, qui définissent la répartition directionnelle de cette énergie. Pour chaque bande de fréquences, on définit non seulement la direction des vagues, mais aussi leur dispersion (moment du deuxième ordre), leur asymétrie (moment du troisième ordre) et leur kurtosis (quatrième ordre). L'asymétrie indique de quelle façon la répartition directionnelle est concentrée (à gauche ou à droite de la moyenne), tandis que le kurtosis définit l'aplatissement de la répartition. L'obtention de ces trois paramètres supplémentaires (dispersion, asymétrie et aplatissement) pour chaque bande de fréquences permet d'améliorer la représentation du champ des vagues.

La mesure des vagues par des bouées ancrées sert également à valider les mesures des vagues émanant de radars haute fréquence.

4.3.7 Hauteur de la colonne d'eau pour la détection de tsunamis

La plupart des tsunamètres montés sur des bouées, qui font appel à la technologie DART® II, indiquent le niveau de l'eau (en fait la hauteur de la colonne d'eau) en se basant sur des mesures de la pression et de la température réalisées au fond des océans et converties en hauteur de la colonne d'eau en multipliant la pression par une constante absolue de 670 mm par livre par pouce carré.

4.3.8 Humidité relative

Les capteurs d'humidité employés dans les bouées comprennent un circuit qui mesure l'humidité grâce à la variation de capacité d'un polymère fin exposé aux fluctuations de la vapeur d'eau. Une membrane perméable aux gaz protège les pièces électroniques des embruns et des particules, mais laisse entrer l'air dans le réservoir de l'instrument. Le capteur d'humidité est dépendant de la température, et intègre donc une sonde de température qui fournit une correction de température lors du calcul de l'humidité relative. L'acquisition de la donnée du capteur est réalisée à une fréquence donnée lors de la période de mesure (par ex. 1 Hz pour les bouées ancrées américaines et canadiennes). Sur les bouées britanniques, françaises et irlandaises de la série K, on réalise une acquisition de valeur instantanée du circuit électrique hygrométrique au moment de l'observation.

4.3.9 Capteurs océaniques

Pour comprendre et prévoir le comportement des océans, il faut surveiller leurs propriétés. De nombreuses bouées permettent de surveiller les océans en mesurant les courants de surface, les profils des courants, la température à proximité de la surface et la qualité de l'eau. Parmi les paramètres se rapportant à la qualité de l'eau, on compte la turbidité, le potentiel d'oxydoréduction (Eh), le pH, la chlorophylle-a et l'oxygène dissous. Les données provenant de bouées subissent un contrôle qualité en temps réel et, si possible, ces données sont diffusées sur le Système Mondial de Télécommunications (SMT).

4.3.9.1 Courants océaniques de surface

Les courants de surface sont mesurés pour porter assistance au commerce, à la sécurité des opérations, à des missions de recherche et de sauvetage, à des interventions à la suite de marées noires et de la détermination des courants situés près de l'entrée des ports qui se répercutent sur le transport maritime. La mesure des courants de surface par des bouées sert aussi à valider la mesure de ces courants par des radars à haute fréquence. La plupart des bouées acquièrent ces données grâce à des échantilleurs acoustiques Doppler installés sur celles-ci.

4.3.9.2 Profils des courants océaniques

Les profils des courants océaniques indiquent le mouvement des océans à divers niveaux de la colonne d'eau. Ces informations sont essentielles pour évaluer la dispersion des marées noires, pour les opérations de recherche et de sauvetage, pour mesurer les contraintes qui s'exercent sur les plates-formes en mer et pour valider les modèles océaniques. Actuellement, ces données sont acquises par des systèmes dirigés vers le bas et montés sur des bouées ou dans des cages. Sur les plates-formes pétrolières en mer, le profil des courants peut être descendant à partir de certains niveaux de la colonne d'eau, ou ascendant à partir d'un système installé sur le fond.

Dans la plupart des bouées, on fait appel à la technique des profileurs Doppler comme capteurs principaux pour la collecte de données de profil des courants océaniques. Ceux-ci émettent des impulsions d'énergie acoustique de courte durée et de haute fréquence le long de faisceaux étroits. Les particules diffusantes (sans doute du necton et du plancton à déplacement passif) situées dans la colonne d'eau renvoient l'énergie rétrodiffusée et les instruments traduisent les déplacements de fréquences Doppler le long du faisceau en coordonnées cartésiennes pour indiquer les courants océaniques à divers niveaux de la colonne d'eau.

4.3.9.3 Salinité

Il faut connaître la salinité de l'eau de mer pour initialiser les modèles océaniques permettant d'obtenir des prévisions océaniques et de prévoir la circulation dans les océans (qui est largement fonction de la densité). En général, on déduit la salinité de la mesure de la conductivité de l'eau de mer. Certains instruments donnent la salinité directement (par le biais de calculs internes) et d'autres indiquent la conductivité, la température et la profondeur nécessaires pour calculer la salinité. La mesure de la salinité est fondée sur l'échelle de salinité pratique, qui fait appel à une relation empirique existante entre la salinité et la conductivité de l'eau de mer (bien que la COI de l'UNESCO ait approuvé une nouvelle équation thermodynamique internationale de l'eau de mer – International Thermo-dynamic Equation of Seawater (TEOS-10) – aux termes de la résolution XXV-7 de son Assemblée). L'unité de salinité utilisée est l'unité de salinité pratique (PSU).

4.3.10 Précipitations

Des pluviomètres à siphon ont été montés sur certaines bouées ancrées.

4.3.11 Mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire, qui a une influence importante sur les processus physiques, biologiques et chimiques à proximité de l'interface atmosphère-océan, intéresse les scientifiques et les ingénieurs. On utilise la mesure du rayonnement solaire en surface pour établir les radiomètres dans le domaine visible montés sur des satellites. Le capteur est placé le plus haut possible sur la plate-forme pour éviter les ombres. On mesure le flux radiatif du soleil en watts par mètre carré et le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) en micromoles par mètre carré par seconde.

4.3.12 Visibilité

Des capteurs de visibilité sont montés sur certaines stations lorsque la visibilité est un élément essentiel de la sécurité de la navigation. Ces capteurs mesurent l'extinction d'une lumière dans un volume réduit d'air situé entre l'émetteur et le récepteur. Il est à noter que ces mesures s'appliquent à un point unique et qu'il en existe plusieurs définitions similaires mais différentes.

4.4 BATEAUX-FEUX NON GARDÉS

Ces plates-formes présentent beaucoup de points communs avec les bouées ancrées. Cependant, étant donné leur taille et donc la charge utile qui peut être

embarquée, il est relativement simple d'installer des capteurs supplémentaires, par exemple des visibilité-mètres. Par mauvais temps, les embruns produits par le navire lui-même sont susceptibles de fausser les valeurs mesurées. En général, toutefois, les performances obtenues sont équivalentes à celles des stations météorologiques automatiques terrestres.

4.5 TOURS ET PLATES-FORMES

Il est possible d'installer des stations météorologiques automatiques standard semblables à celles qu'on trouve à terre (voir le chapitre 1 de la Partie II) sur des tours d'observation construites près des côtes, dans des eaux relativement peu profondes, et sur des plates-formes situées dans des zones reculées. On y ajoute souvent certains capteurs, comme des appareils de mesure de vagues et du niveau moyen de l'eau au-dessus d'un point de référence, des célo-mètres et des capteurs de visibilité. Les plates-formes fixes peuvent inclure de grandes structures gravitaires, des plates-formes mobiles à vérins et des plates-formes semi-submersibles. Les plates-formes à vérins et semi-submersibles et les navires de forage peuvent être considérés comme des plates-formes stationnaires du fait qu'ils sont amarrés ou placés dynamiquement de façon à rester à un endroit donné en cours de fonctionnement. Sur les plates-formes où il y a une présence humaine et sur les plates-formes pétrolières, les mesures peuvent être complétées par une estimation visuelle des nuages, de la visibilité et du temps sensible, ce qui permet d'établir des messages d'observation synoptique complets. Les observations visuelles émanant de plates-formes d'extraction de pétrole ou de gaz devraient être effectuées conformément aux procédures recommandées en 4.2 ci-dessus. Dans certains cas, toutefois, on fait appel à des procédures différentes. Par exemple, une plate-forme peut produire des données sur les vagues émanant d'une bouée ancrée à proximité et des données sur la température de la mer en surface issues d'un bateau de ravitaillement proche.

Certaines plates-formes fixes ou stationnaires (d'extraction de pétrole ou de gaz) peuvent indiquer la hauteur significative et la période des vagues dans des bulletins météorologiques (où l'on utilise les mêmes parties du code FM 13 SHIP que pour les bouées ancrées) en utilisant les données issues d'une bouée proche ou d'un radar embarqué d'observation des vagues.

Les plates-formes et les tours sont des structures pratiques pour le montage de capteurs météorologiques. Leur installation et leur entretien sont généralement moins compliqués et plus économiques que pour

les bouées ancrées, entraînant donc une meilleure fréquence et fiabilité des données. La qualité des données n'est pas affectée par les mouvements du navire ou de la bouée et ces données risquent moins d'être erronées du fait des dommages de l'action des vagues sur les capteurs.

Cependant, les capteurs de température et d'humidité doivent être positionnés très soigneusement, car certaines sources de chaleur et d'échappement modifient souvent le milieu environnant et les valeurs ne sont plus représentatives des conditions de l'environnement. Le vent, parfois mesuré à plus de 100 m au-dessus du niveau moyen de la mer, doit être corrigé de façon à correspondre à la valeur équivalente à 10 m de la surface. (On notera que dans l'idéal, il faudrait connaître également l'observation réelle et sa hauteur.) Si une tour se trouve près du rivage, l'amplitude des marées peut modifier notablement la hauteur effective de l'anémomètre.

En conclusion, donc, les tours fixes et les plates-formes en mer peuvent constituer une source économique de données, les bouées ancrées devant être utilisées à des endroits plus reculés où il n'y a pas d'autre solution.

4.6 BOUÉES DÉRIVANTES

Les bouées dérivantes sont employées depuis de nombreuses années en océanographie, surtout pour mesurer les courants de surface. La mise au point de systèmes fiables de localisation par satellites et de transmissions des données (OMM/COI (1995a)) a entraîné une multiplication du nombre de bouées voguant librement à la surface des océans. Par ailleurs, les performances des capteurs utilisés en météorologie et en océanographie ont beaucoup évolué.

Un guide de l'UNESCO (1988) contient une description des bouées dérivantes et de leur fonctionnement. Plus récemment, le Groupe de coopération OMM/COI pour les programmes de bouées de mesure (DBCP) a publié Surface Velocity Programme Barometer Drifter Design Reference. (OMM/COI (2005)). Voir aussi les rapports annuels et les comptes rendus d'ateliers du DBCP, comme OMM/COI (2004a et 2004b).

L'évolution de la technologie dans ce secteur répond aux besoins de la recherche océanographique d'une part et de la météorologie opérationnelle d'autre part. On peut donc distinguer globalement trois grands types de bouées :

- Pour la recherche océanographique et plus spécialement pour l'Expérience mondiale de

- circulation océanique (Programme concernant la vitesse des courants en surface (SVP), 1988-1993), on a mis au point et déployé un grand nombre de bouées dérivantes qui suivent les courants et peuvent également mesurer la température de la mer en surface ;
- b) Pour la météorologie opérationnelle, on a perfectionné les bouées dérivantes conçues dans le cadre de la Première Expérience mondiale du GARP (Global Atmospheric Research Programme). Ces bouées mesurent surtout la pression atmosphérique, la température de la mer en surface et la température de l'air ;
- c) Pour les applications polaires, on a conçu diverses bouées sur glace devant mesurer des variables atmosphériques traditionnelles ainsi que l'état de la glace et de la neige (température de la glace/neige et profils de température de la glace, épaisseur de la glace, tension de la glace, état de l'eau sous la glace). En repérant la position de la bouée sur la glace, on peut évaluer les déplacements de la glace. On a cherché à mettre au point des bouées qui répondent simultanément aux besoins de la recherche océanographique et de la météorologie opérationnelle, d'où :
- L'élaboration de la bouée dérivante SVP-B, qui, pour l'essentiel, est une bouée entraînée par les courants de surface à laquelle on a ajouté un capteur de pression de l'air ;
 - L'élaboration de la bouée dérivante SVP-BW (ou Minimet), qui, pour l'essentiel, est une bouée SVP-B ayant la possibilité de mesurer le vent au moyen de la technique Wind Observation Through Ambient Noise (WOTAN) ;
 - L'élaboration de la bouée de profilage du vent et de la température, qui, pour l'essentiel, est une bouée dérivante météorologique équipée d'un capteur de vitesse du vent et d'une chaîne de thermistance immergée pour établir le profil de la température jusqu'à une profondeur d'environ 100 m. On détermine la direction du vent car la bouée se place face au vent au moyen d'un mât profilé ou d'une girouette fixe ;
 - L'ajout de capteurs de salinité sur les bouées SVP.
- Les bouées dérivantes n'étant pas récupérables, leurs performances sont le fruit d'un compromis entre les exigences scientifiques et les considérations économiques. En sus des coûts d'acquisition du matériel, il faut noter que les frais de traitement et de diffusion des données par le biais du système de satellites Argos sont importants et peuvent être un facteur limitant le déploiement des bouées dérivantes, bien que la mise en place récente du système télécommunications satellitaires Iridium réduit cet obstacle. Toutefois, le rendement des capteurs montés sur des bouées dérivantes est suffisant pour la météorologie synoptique ou l'océanographie, selon le cas. On notera que la qualité des observations sur la vitesse du vent étant douteuse, celles-ci ne sont pas employées par les centres opérationnels (Ingleby (2010)).
- Les incertitudes généralement associées aux valeurs issues des systèmes opérationnels sont les suivantes :
- | | |
|----------------------------------|--|
| Température de la mer en surface | 0,21 °C ^a |
| Pression de l'air | 0,84 hPa ^b |
| Vitesse du vent | 3,5 m s ⁻¹ ou 10 % ^{abc} |
| Direction du vent | 18,5° ^b |
| Température sous la surface | 0,1 °C |
-
- (a) Source : O'Carroll (2008)
- (b) Source : Statistiques du CEPMMT sur le contrôle des bouées, janvier 2010
- (c) Ces incertitudes sont valables pour les vents faibles et les mers peu agitées uniquement en raison de la faible hauteur des capteurs (environ 1 m au-dessus du niveau de la mer).

ANNEXE 4.A

CENTRES RÉGIONAUX OMM/COI D'INSTRUMENTS MARITIMES

1. Vu la nécessité de mesures météorologiques maritimes et océanographiques de haute qualité émanant des océans du monde pour subvenir aux besoins des programmes de l'OMM et de la COI de l'UNESCO et des programmes coparrainés, la nécessité d'installations permettant l'étalonnage et l'entretien réguliers d'instruments maritimes et le contrôle des performances des instruments à l'échelon régional afin que les observations océaniques et les métadonnées associées soient conformes à des normes de haut niveau concernant les instruments et les méthodes d'observation, la nécessité de documenter des techniques de mesure pour comprendre les erreurs systématiques introduites par chaque type d'instrument et pour élaborer des méthodes permettant de corriger ces erreurs afin de produire et d'exploiter des jeux de données cohérents, il est recommandé⁴ que les centres régionaux d'instruments maritimes (RMIC) disposent des capacités suivantes pour s'acquitter de leurs tâches :

Capacités

- a) Un RMIC doit disposer des installations et du matériel de laboratoire voulus pour réaliser des tâches nécessaires d'étalonnage des instruments météorologiques et océanographiques connexes déployés afin de subvenir aux besoins communs des programmes maritimes de l'OMM et de la COI de l'UNESCO et des programmes coparrainés ;
- b) Un RMIC doit entretenir un ensemble d'instruments ou d'étalons météorologiques et océanographiques standard et établir la traçabilité de ses propres normes et instruments de mesure par rapport au Système international d'unités (SI) ;
- c) Un RMIC doit disposer d'un personnel d'encadrement et technique ayant l'expérience nécessaire pour s'acquitter de ses fonctions ;
- d) Un RMIC doit mettre au point ses propres procédures techniques pour l'étalonnage d'instruments météorologiques et océanographiques connexes en utilisant son propre matériel d'étalonnage ;
- e) Un RMIC doit élaborer ses propres procédures d'assurance de la qualité ;
- f) Un RMIC doit participer à des inter-comparaisons entre laboratoires d'instruments et de méthodes standard d'étalonnage ou organiser de telles comparaisons ;
- g) Un RMIC doit faire appel aux ressources et aux capacités de sa région dans l'intérêt supérieur de cette région, le cas échéant ;
- h) Un RMIC doit, autant que possible, respecter les normes internationales applicables aux laboratoires d'étalonnage telles que la norme ISO/CEI 17025 ;
- i) Une autorité reconnue⁵ doit évaluer RMIC au moins tous les cinq ans pour en vérifier les capacités et les performances.

Fonctions correspondantes

- a) Un RMIC doit aider les Membres et États membres de sa région à étalonner leurs étalons météorologiques nationaux et les instruments océanographiques connexes de contrôle, selon ses capacités ;
- b) Un RMIC doit participer à des comparaisons JCOMM et/ou régionales d'instruments ou organiser de telles comparaisons en respectant les recommandations pertinentes de la JCOMM ;
- c) Un RMIC doit apporter une contribution aux Membres et États membres en ce qui concerne la qualité des mesures ;
- d) Un RMIC doit donner des conseils aux Membres et aux États membres à propos de la vérification des performances, de l'entretien des instruments et de la disponibilité de directives pertinentes ;
- e) Un RMIC doit participer ou contribuer activement à l'organisation d'ateliers régionaux sur les instruments et les mesures météorologiques et océanographiques connexes ;
- f) Un RMIC doit collaborer avec d'autres centres régionaux à la normalisation des mesures et des capteurs météorologiques et océanographiques connexes ;
- g) Un RMIC doit informer régulièrement les Membres et les États membres et signaler tous les ans au Comité de gestion de la JCOMM les services offerts aux Membres et aux États membres et les activités réalisées. La JCOMM, quant à elle, doit tenir au courant les conseils exécu-

⁴ Recommandation de la Commission technique mixte OMM/COI d'océanographie et de météorologie maritime à sa troisième session, organisée en 2009.

⁵ La JCOMM est l'organisme qui propose officiellement de nouveaux centres et qui propose toute autorité chargée d'effectuer des évaluations.

- tifs de l'OMM et de la COI de l'UNESCO de la situation et des activités des centres régionaux et proposer des modifications selon les besoins.
2. Le mécanisme de désignation officielle des centres régionaux par l'OMM et la COI de l'UNESCO implique les points suivants :
 - a) La gouvernance pour la définition des fonctions et l'adoption d'un RMIC est proposée par la JCOMM et approuvée par les conseils exécutifs de l'OMM et de la COI de l'UNESCO ;
 - b) Un candidat aux fonctions de RMIC doit produire une déclaration de conformité, indiquer les capacités du centre proposé, déclarer l'ensemble des compétences offertes en matière d'instruments, s'engager officiellement à accueillir volontairement le centre et faire la preuve de ses capacités auprès de la JCOMM ;
 - c) La création d'un RMIC est instaurée par la JCOMM et le processus de désignation est coordonné par la JCOMM et le Secrétariat de l'OMM/COI, conformément au processus approuvé par la JCOMM et documenté dans le Rapport technique N° 53 de la Commission ;
 - d) Si plusieurs RMIC sont établis dans une même Région de l'OMM et/ou de la COI, les centres devraient coordonner leur action pour réduire au minimum le double emploi des services.
 3. Liste des centres régionaux d'instruments maritimes. Les centres suivants ont été désignés comme centres régionaux d'instruments maritimes :
- | <i>Région</i> | <i>Centre</i> | <i>Lieu</i> |
|---------------|---|--|
| Région II | Centre national des normes et de la métrologie océaniques | Tianjin, Chine |
| Région IV | National Data Buoy Center | Stennis Space Center, Mississippi, É.-U. |

ANNEXE 4.B

DESCRIPTION DES PRÉCIPITATIONS À L'USAGE DES OBSERVATEURS À BORD DE NAVIRES

Les précipitations se produisent de manière plus ou moins uniforme (intermittente ou continue) ou sous forme d'averses.

Il convient de préciser le caractère intermittent ou continu de toutes les précipitations signalées, sauf dans le cas des averses.

Les précipitations qui ne prennent pas la forme d'averses proviennent généralement de nuages stratiformes (principalement des altostratus et des nimbostratus). Les averses sont pour leur part originaires de gros nuages convectifs (principalement des cumulonimbus ou des cumulus d'extension verticale modérée à forte); en général, elles débutent et s'arrêtent brusquement et présentent des variations d'intensité. Les gouttes et les particules solides déversées pendant une averse sont souvent plus grosses que dans les autres formes de précipitations.

Les gouttelettes provenant des nuages peuvent être surfondues (c'est-à-dire que leur température est inférieure à 0 °C). Lorsqu'elles frappent une surface, les gouttelettes de pluie surfondue forment un mélange d'eau et de glace dont la température est voisine du point de congélation.

Formes des précipitations

Les catégories décrites ci-après sont conformes aux définitions données dans la Partie III.2 du volume I de l'Atlas international des nuages (OMM (1975)).

Bruine : précipitation assez uniforme de très fines gouttes d'eau, dont le diamètre est normalement inférieur à 0,5 mm. Les gouttes semblent presque flotter, ce qui rend visible les moindres mouvements atmosphériques. La bruine provient d'un couche continue et assez dense de nuages stratiformes, généralement bas et touchant parfois la surface (brouillard). Pour le codage, la bruine peut être dite faible, modérée ou forte :

- Une *bruine faible* est facile à déceler sur les vitres de la timonerie mais produit peu d'écoulement à partir des ponts, des toits, etc. ;
- Une *bruine modérée* provoque un ruisseaulement d'eau sur les vitres, les ponts et les superstructures ;
- Une *bruine forte* a les mêmes effets qu'une bruine modérée. La visibilité est inférieure à 1 000 m.

Pluie : précipitation de gouttes d'eau provenant d'un nuage. Le diamètre et la concentration des gouttes de pluie varient considérablement en fonction de l'intensité de la précipitation et surtout en fonction de sa nature (pluie continue, averse de pluie, pluie diluvienne, etc.). La pluie continue tombe généralement d'une ou de plusieurs couches uniformes de nuages stratiformes épais. Pour le codage, la pluie peut être dite faible, modérée ou forte :

- une *pluie faible* est composée de grosses gouttes éparses ou de nombreuses gouttes plus petites. La vitesse d'accumulation sur les ponts est faible et les flaques se forment très lentement ;
- une *pluie modérée* est formée de gouttes que l'on ne peut distinguer clairement. Des embruns sont visibles et les flaques se forment rapidement. Le bruit sur les toits va d'un tapotement à un faible grondement ;
- une *pluie forte* déverse des trombes d'eau avec fracas sur les bâches et les ponts et forme un brouillard de fines gouttelettes en s'écrasant sur les ponts.

Neige : précipitation de cristaux de glace, agglomérés ou non, provenant d'un nuage. La forme, la taille et la concentration des cristaux varient considérablement selon les conditions existant au moment de la précipitation. Pour le codage, une chute de neige est dite faible, modérée ou forte.

Averses : elles se caractérisent par un début et une fin brusques et par des variations généralement rapides, parfois violentes, de leur intensité. Les gouttes et les particules solides déversées sont généralement plus grosses que dans les autres formes de précipitations. C'est la nature des nuages qui détermine si une précipitation (de pluie ou de neige) prendra ou non cette forme. Les averses, issues de gros nuages convectifs, se définissent ainsi :

- une *averse de pluie ou de neige* peut être codée faible, modérée ou forte, en fonction de son intensité. La description est identique à celle donnée pour une chute de pluie ou de neige faible, modérée ou forte. Il faut savoir, cependant, que la visibilité est beaucoup plus variable pendant une averse que pendant une pluie continue codée de même intensité ;
- une *averse violente* est une averse de pluie extrêmement forte ou torrentielle. On observe surtout ce phénomène dans les régions tropicales.

Neige roulée : précipitation de particules de glace blanches et opaques provenant d'un nuage, généralement coniques ou sphériques, dont le diamètre peut atteindre 5 mm. Leur structure étant proche de celle de la neige, ces grains sont friables et s'écrasent facilement. Lorsqu'ils heurtent une surface dure, ils rebondissent et ont tendance à se casser. Les chutes de neige roulée prennent souvent la forme d'averses, qui contiennent fréquemment des flocons de neige, lorsque la température près de la surface est voisine de 0 °C. L'intensité des chutes de neige roulée, quand elles surviennent seules, est déterminée par la visibilité, comme dans le cas de la neige.

Grêle : précipitation de particules de glace (grêlons) transparentes ou plus ou moins opaques, généralement de forme sphérique, conique ou irrégulière, dont le diamètre se situe entre 5 et 50 mm (les particules plus petites ayant la même origine peuvent être classées dans le grésil ou les granules de glace). Les particules tombent soit séparément, soit agglomérées en blocs irréguliers. La grêle survient toujours sous forme d'averse et souvent au cours d'orages violents. Pour le chiffrement, la grêle peut être dite faible, modérée ou forte, selon la vitesse d'accumulation des grêlons :

- a) une *grêle faible* se caractérise par la chute de quelques grêlons, sans accumulation notable sur les surfaces planes ;
- b) une *grêle modérée* produit une lente accumulation de grêlons, suffisante pour blanchir les ponts ;
- c) une *grêle forte* se traduit par une accumulation rapide de grêlons, phénomène rare en mer sous les latitudes tempérées.

Grésil : précipitation de particules de glace translucides provenant d'un nuage, quasi sphériques, présentant parfois des pointes coniques. Leur diamètre peut atteindre, voire dépasser, 5 mm. En général, le grésil ne s'écrase pas facilement et, lorsqu'il heurte une surface dure, il rebondit en produisant un bruit sec. Il survient toujours sous forme d'averse. Pour le chiffrement, le grésil peut être dit faible, modéré ou fort, selon le barème de la vitesse d'accumulation donné pour la grêle.

Granules de glace : précipitation de particules de glace transparentes provenant d'un nuage, le plus souvent sphériques ou irrégulières, rarement coniques, dont le diamètre est inférieur à 5 mm. En général, les granules de glace ne s'écrasent pas facilement et, lorsqu'ils heurtent une surface dure, ils rebondissent en produisant un bruit sec. Ces précipitations sont issues en général d'altostratus ou de nimbostratus. Leur intensité est établie en suivant le barème donné pour la grêle.

Neige en grains : précipitation de très petites particules de glace blanches et opaques provenant d'un nuage, relativement plates ou allongées, dont le diamètre est généralement inférieur à 1 mm. Lorsqu'ils atteignent une surface dure, les grains ne rebondissent pas. Les chutes de neige en grains sont en principe peu intenses, elles sont issues le plus souvent de stratus ou de brouillard et ne prennent jamais la forme d'averses. Elles correspondent en quelque sorte à la bruine et se produisent quand la température se situe entre 0 °C et - 10 °C environ. Comme il n'existe qu'une seule spécification de code pour la neige en grains (ww - 77), il n'est pas nécessaire de préciser l'intensité de la précipitation.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- AMS, 2000 : *Glossary of Meteorology*, deuxième édition, American Meteorological Society.
- Bourras, D., 2006 : Comparison of five satellite-derived latent heat flux products to moored buoy data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 6291-6313.
- Bowditch, N. et la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), 2002 : *The American Practical Navigator : An Epitome Of Navigation*, 2002, édition du bicentenaire, publ. N° 9 de la NIMA, Bethesda.
- Bradley, F. et C. Fairall, 2007 : A Guide to Making Climate Quality Meteorological and Flux Measurements at Sea. NOAA Technical Memorandum OAR PSD-311, NOAA/ESRL/PSD, Boulder, CO, 108 p. ftp://ftp.etl.noaa.gov/user/cfairall/wcrp_wgsf/flux_handbook/fluxhandbook_NOAA-TECH%20PSD-311v3.pdf
- Hasse, L., M. Grossklaus, K. Uhlig. et P. Timm : A ship rain gauge for use in high winds, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 15, 380-386, 1998.
- Ingleby, B., 2010 : Factors affecting ship and buoy data quality : A data assimilation perspective. Présenté au *J. Atmos. and Oceanic Tech.*
- Kent, E. C. et D. I. Berry, 2005 : Quantifying Random Errors in Voluntary Observing Ships Meteorological Observations, *Advances in the Applications of Marine climatology, The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Climatology* - JCOMM TR No. 13 REV. 1 - WMO/TD No. 1081 REV. - Juin 2005. Disponible à l'adresse : <ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/amp/mmop/documents/JCOMM-TR/J-TR-13-Marine-Climatology/REV1/joc1167.pdf>
- Kent E. C., P. K. Taylor et S. A. Josey, 2003 : Improving Global Flux Climatology: The Role of Metadata, dans *Advances in the Applications Of Marine Climatology : The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD-No. 1081, 89-97. Disponible à l'adresse : http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/jcomm_reports.html#JCOMMTR13
- Liu et al., 1979 - Liu, W.T., K.B. Katsaros et J.A. Businger, 1979 : Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constants at the interface, *J. Atmos. Sciences*, 36, 1722-1735
- Moat, B. I., M. J. Yelland et A. F. Molland, 2006 : Quantifying the airflow distortion over merchant ships, Part II : Application of model results, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(3), 351-360. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH1859.1>
- NDBC, 2003 : *Non-directional and Directional Wave Data Analysis Procedures*, NDBC Technical Document 03-01, National Data Buoy Center, Stennis Space Center MS, 51 p.
- NDBC, 2009 : *Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures*, NDBC Technical Document 09-02, National Data Buoy Center, Stennis Space Center.
- Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 1988 : *Guide to Drifting Data Buoys*. Manuels et guides de l'OMM/COI, 20.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1962 : *Precipitation Measurements at Sea*. Note technique N° 47, WMO-No. 124.TP.55, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1970 : *Nomenclature des glaces de mer*. Volumes I et III, OMM-N° 259. TP 145, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1972 : *Comparative Sea-surface Temperature Measurements* (R.W. James et P.T. Fox). Report on Marine Science Affairs No. 5, WMO-No. 336, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1974 : *The Meteorological Aspects of Ice Accretion on Ships* (H.C. Shellard). Report on Marine Science Affairs No. 10, WMO-No. 397, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1975 : *Atlas international des nuages*. Volume I, OMM-N° 407, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1981 : *Precipitation Measurement at Sea* (G. Olbrück). Rapport d'activités N° 1 sur la météorologie maritime et les activités océanographiques connexes, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1989 : *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (R.J. Shearman et A.A. Zelenko). Rapport d'activités N° 22 sur la météorologie maritime et les activités océanographiques connexes, WMO/TD-No. 311, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1991a : *Recueil de notes de cours de météorologie maritime pour la formation professionnelle du personnel météorologique des classes III et IV* (J.M. Walker). Deuxième édition, OMM-N° 434, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1991b : *The Accuracy of Ship's Meteorological Observations: Results of the VSOP-NA* (E.C. Kent, B.S. Truscott, P.K. Taylor et J.S. Hopkins). Rapport d'activités N° 26 sur la météorologie maritime et les activités océanographiques connexes,, WMO/TD-No. 455, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1995 : *Manuel des codes*, Volumes I.1 et I.2, OMM-N° 306, Genève

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Organisation Météorologique Mondiale, 1998 : *Guide de l'analyse et de la prévision des vagues*. Deuxième édition, OMM-N° 702, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1999 : The accuracy of meteorological observations from Voluntary Observing ships : Present status and future requirements (P.K. Taylor et E.C. Kent). *Rapport final de la première session du sous-groupe pour les navires d'observation bénévoles du Groupe de travail des systèmes d'observation maritime relevant de la Commission de météorologie maritime* (Athènes, 1999), WMO TC CMM 1999, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2001 : *Guide de l'assistance météorologique aux activités maritimes*. Troisième édition, OMM-N° 471, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel du Système mondial d'observation*. Volumes I et II, OMM-N° 544, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale/Commission Océanographique Intergouvernementale, 1995 : *Guide to Data Collection and Location Services using Service Argos*. Document technique N° 3 du Groupe de coopération pour les programmes de bouées de mesure (DBCP), Genève et Paris.
- Organisation Météorologique Mondiale/Commission Océanographique Intergouvernementale, 1996 : *Guide to Moored Buoys and Other Ocean Data Acquisition Systems* (E.A. Meindl). Document technique N° 8 du Groupe de coopération pour les programmes de bouées de mesure, Genève et Paris.
- Organisation Météorologique Mondiale/Commission Océanographique Intergouvernementale, 2004a : *Data Buoy Cooperation Panel : Annual Report for 2003*. Document technique N° 25 du Groupe de coopération pour les programmes de bouées de mesure (DBCP), Genève et Paris (disponible à l'adresse <http://www.jcommops.org/dbcp>).
- Organisation Météorologique Mondiale/Commission Océanographique Intergouvernementale, 2004b : *Research, Applications and Developments involving Data Buoys*. Présentations lors de l'Atelier technique du Groupe de coopération pour les programmes de bouées de mesure (Angra Dos Reis, Brésil, octobre 2003). Document technique N° 24 du Groupe de coopération pour les programmes de bouées de mesure (DBCP), Genève et Paris.
- Organisation Météorologique Mondiale/Commission Océanographique Intergouvernementale, 2009 : *Surface Velocity Programme Barometer Drifter Design Reference*. Document technique N° 4 du Groupe de coopération pour les programmes de bouées de mesure (DBCP), révision 2.2, Genève et Paris.
- Service météorologique britannique, 1995 : *Marine Observers Handbook*. Onzième édition, UK Met Office No. 1016, Londres.
- Swail, V., R.E. Jensen, B. Lee, J. Turton, J. Thomas, S. Gulev, M. Yelland, P. Etala, D. Meldrum, W. Birkemeier, W. Burnett et G. Warren, 2010 : Wave measurement needs and developments for the next decade. *OceanObs09*.
- Taylor, P. K., E. C. Kent, M. J. Yelland et B. I. Moat, 2003 : The Accuracy of Marine Surface Winds From Ships and Buoys, dans *Advances in the Applications Of Marine Climatology : The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD-No. 1081, 27-40. Disponible à l'adresse : http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/jcomm_reports.html#JCOMMTR13.
- WBAN 1964 - WBAN, 1963 : Manual of Barometry, Vol 1, Ed 1, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Wilkerson, J.C. et M.D. Earle, 1990 : A study of differences between environmental reports by ships in the voluntary observing program and measurements from NOAA buoys. *Journal of Geophysical Research*, Volume 95, N° C3, p. 3373-3385.
- Yelland, M.J., B. I. Moat et P. K. Taylor, 2001 : *Air flow distortion over merchant ships*. Rapport d'activité présenté au Service de l'environnement atmosphérique du Canada, 32 p. (disponible à l'adresse : <http://eprints.soton.ac.uk/67256>).

CHAPITRE 5

TECHNIQUES SPÉCIALES D'OBTENTION DE PROFILS DE LA COUCHE LIMITÉE ET DE LA TROPOSPHÈRE

5.1 GÉNÉRALITÉS

Des techniques spéciales d'obtention de profils ont été mises au point de manière à collecter les données à haute résolution spatio-temporelle requises pour l'analyse, la prévision et la recherche aux petites échelles météorologiques, pour diverses applications. Le présent chapitre donne un aperçu général des systèmes actuels, basés au sol, qui peuvent être utilisés à cette fin. Il est divisé en deux grandes sections : l'une consacrée aux techniques de télédétection et l'autre aux méthodes de mesure directe *in situ*. Certaines de ces techniques peuvent servir à effectuer des mesures dans toute la troposphère tandis que d'autres sont réservées aux mesures dans la basse troposphère et en particulier dans la couche limite planétaire.

Les techniques de télédétection reposent sur l'interaction de l'énergie électromagnétique ou acoustique avec l'atmosphère. Physiquement séparé de la variable à mesurer (par opposition à la mesure *in situ*), l'instrument de mesure appliqué à l'atmosphère peut faire appel à des techniques passives ou actives. Les premières mettent à profit le rayonnement naturellement présent dans l'atmosphère (radiomètres à hyper-fréquences) alors que les secondes se caractérisent par l'introduction d'un rayonnement artificiel dans l'atmosphère (sodars, profileurs de vent, systèmes de sondage radio-acoustique (RASS) et lidars). Ces techniques d'obtention de profils à partir du sol sont décrites dans la section 5.2. D'autres méthodes de télédétection qui relèvent de la présente section sont traitées dans les chapitres 8 et 9 de la partie I consacrés aux observations par satellite et aux radars météorologiques.

La section 5.3 décrit les techniques de mesure *in situ* par des instruments fixés à divers supports de manière à être directement en contact avec la couche limite (radiosondes ou instruments montés sur des ballons libres ou captifs, des tours ou des mâts). Les chapitres 12 et 13, partie I décrivent les techniques les plus couramment utilisées, faisant appel à des ballons, pour obtenir des profils atmosphériques.

Les techniques d'obtention de profils sont amplement documentées. Pour les discussions générales et les comparaisons, il convient de se référer aux ouvrages de Derr (1972), de Martner *et al.* (1993) et au Rapport n° 3 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation de l'OMM (WMO,

1980), ainsi qu'au numéro spécial de la revue *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* (Volume II, No. 1, 1994).

5.2 TECHNIQUES DE TÉLÉDÉTECTION À PARTIR DU SOL

5.2.1 Sondeurs acoustiques (sodars)

Les sodars (acronyme de Sonic Detection And Ranging — détection et télémétrie acoustiques) reposent sur le principe de la diffusion des ondes acoustiques par l'atmosphère. Selon la théorie de la diffusion du son, une impulsion sonore émise dans l'atmosphère est diffusée sous l'effet des variations de l'indice de réfraction de l'air provoquées par des fluctuations à petite échelle et de type turbulent de la température et de la vitesse de l'air, qui se produisent naturellement dans l'atmosphère et sont spécialement liées aux forts gradients de température et d'humidité associés aux inversions. Dans le cas de la rétrodiffusion (180°), seules les fluctuations de température dont l'échelle correspond à la moitié de la longueur d'onde du signal acoustique incident déterminent le retour d'écho alors que dans d'autres directions celui-ci est causé aussi bien par des fluctuations de température que par des fluctuations de la vitesse de l'air sauf à un angle de 90°, où il n'y a pas de diffusion.

Sur le thème du sondage acoustique, on pourra consulter utilement les ouvrages de Brown et Hall (1978), de Neff et Coulter (1986), de Gaynor *et al.* (1990) et de Singal (1990).

Divers types de sondeurs acoustiques ont été mis au point mais les plus couramment considérés à des fins pratiques, sont le sodar monostatique et le sodar Doppler monostatique.

Un sodar monostatique consiste en une source sonore pulsée en visée verticale et en un récepteur situé au même point. Une petite partie de chaque impulsion sonore est rétrodiffusée vers le récepteur sous l'effet des fluctuations thermiques naturelles de l'air. Le récepteur mesure l'intensité du son qui lui parvient en retour. Comme pour un radar classique, le laps de temps entre l'émission du son et la réception de l'écho révèle la distance à laquelle se trouve la cible. Dans le cas d'un sodar bistatique, le récep-

teur est situé à quelque distance de la source sonore de manière à recevoir les signaux provoqués par les fluctuations de la vitesse de l'air.

Un sodar Doppler monostatique sert non seulement à mesurer l'intensité du signal de retour mais aussi à analyser le spectre des fréquences des signaux émis et reçus de façon à déterminer l'écart de fréquence, dû à l'effet Doppler, entre le son émis et le son rétrodiffusé. Cette différence vient du fait que les fluctuations de température suivent les mouvements de l'air, et elle permet ainsi de mesurer la composante radiale du vent. Un sodar Doppler utilise en général trois faisceaux, un faisceau vertical et deux faisceaux obliques, de façon à déterminer les composantes du vent dans trois directions. De ces composantes sont déduits le vent vertical et le vent horizontal. Le vecteur vent peut être représenté en coordonnées hauteur-temps à des intervalles de hauteur compris entre 30 et 50 mètres.

La hauteur maximale que peuvent atteindre les sondes acoustiques dépend de leurs caractéristiques propres mais aussi des conditions atmosphériques. Il existe des systèmes économiques qui peuvent atteindre d'ordinaire des hauteurs de 600 m ou plus pour une résolution verticale de quelques dizaines de mètres.

Un sodar pourrait avoir les caractéristiques suivantes :

Paramètre	Valeur type
Fréquence des impulsions	1 500 Hz
Durée des impulsions	0,05 à 0,2 s
Période de répétition des impulsions	2 à 5 s
Ouverture du faisceau	15°
Puissance acoustique	100 W

Les sodars monostatiques permettent normalement d'obtenir une courbe hauteur-temps de la puissance du signal d'écho rétrodiffusé. Ce type de graphique contient une foule de détails sur la structure interne de la couche limite et peut servir en principe à déterminer les hauteurs d'inversion, l'épaisseur de la couche de mélange et l'épaisseur du brouillard, et à observer les modifications de la couche limite. L'interprétation correcte des graphiques nécessite toutefois de solides compétences et notions de base, complétées si possible par des données d'observation in situ et une connaissance de la situation météorologique générale.

Les sodars Doppler monostatiques permettent d'établir des profils du vent et donnent aussi des renseignements sur sa force. Ces systèmes peu onéreux qui fournissent des renseignements sur les vents dans la couche limite, conviennent particulièrement pour la surveillance continue des inversions et des vents à proximité d'installations industrielles susceptibles de poser des problèmes de pollution.

Le principal défaut du sodar, outre sa portée restreinte, est sa sensibilité aux sons parasites. Ceux-ci peuvent provenir du trafic, des précipitations ou des vents forts. Il est donc exclu que ce système puisse être utilisé par tous les temps. En outre, les sodars émettent des sons dont la nature et l'intensité peuvent constituer une nuisance pour le voisinage, ce qui peut exclure leur utilisation dans des environnements par ailleurs favorables.

Certains systèmes utilisent de la mousse absorbante pour atténuer les bruits extérieurs et réduire les nuisances acoustiques. Comme cette mousse se détériore avec le temps, il faut la remplacer régulièrement pour maintenir les performances de l'instrument.

5.2.2 Radars profileurs de vent

Les profileurs de vent sont des radars Doppler à ondes métriques (VHF) ou décimétriques (UHF) conçus pour établir des profils du vent quelles que soient les conditions météorologiques. Ces radars détectent les signaux rétrodiffusés par les irrégularités de l'indice de réfraction radioélectrique liées aux tourbillons de turbulence, à des échelles correspondant à la moitié de la longueur d'onde du radar (condition de Bragg). Comme les tourbillons de turbulence sont emportés par le vent moyen, leur vitesse de déplacement permet de mesurer directement ce dernier. Contrairement aux radars météorologiques classiques, les profileurs de vent peuvent fonctionner en l'absence de nuages et de précipitations. Ils mesurent le plus souvent la vitesse radiale de l'air dans trois directions ou plus (à la verticale et à 15° de la verticale vers le nord et vers l'est) et de ces valeurs sont déduites les composantes horizontale et verticale du vent. Certains systèmes, plus simples, ne mesurent la vitesse radiale que dans deux directions obliques et, tablant sur une vitesse verticale de l'air négligeable, déterminent la composante horizontale du vent. La technique de mesure du profileur de vent à quatre faisceaux est plus pratique que celle à trois faisceaux car ses mesures ne sont pas sensiblement affectées par le vent vertical (Adachi and others, 2005).

Pour de plus amples renseignements, il convient de se référer à Gossard et Strauch (1983), Hogg *et al.* (1983), Strauch *et al.* (1990), Weber et Wuertz (1990), et au Rapport n° 57 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation de l'OMM (WMO, 1994).

Du fait de la nature de la propagation des ondes radioélectriques et de leur atténuation, les radars profileurs de vent doivent fonctionner à une fréquence comprise entre 40 et 1300 MHz (7,5 m à 23 cm). À des fréquences supérieures, ils fonctionnent en effet beaucoup moins bien. Le choix de la fréquence

d'exploitation dépend de la portée verticale et de la résolution requises. Dans la pratique, ce type de radar est conçu pour fonctionner dans trois bandes de fréquence (autour de 50, 400 et 1000 MHz) en mode courte portée (impulsion courte, faible altitude) ou en mode longue portée (impulsion longue, altitude élevée), selon que l'on privilégie la résolution ou la portée verticale. Les caractéristiques habituelles des radars profileurs de vent sont résumées dans le tableau ci-après.

Les profileurs peuvent fonctionner sans surveillance et mesurer le vent de façon continue presque à la verticale du site. Ce sont là leurs principaux avantages par rapport aux systèmes de suivi de ballons.

Il existe pour tout profileur une portée minimale et une portée maximale en deçà et au-delà desquelles il ne peut effectuer de mesure. La portée minimale dépend de la longueur de l'impulsion émise, du temps de récupération du récepteur radar et de la puissance des échos de sol renvoyés par les objets environnants. L'emplacement de ce type d'appareil doit donc être choisi de telle sorte que ces échos de sol soient aussi faibles que possible. Dans des vallées ou dans des dépressions les sites doivent être choisis de façon que seul le sol situé à proximité immédiate soit visible. Ces considérations sont très importantes dans le cas des profileurs stratosphériques. Les incidences des échos de sol sur les radars à haute fréquence peuvent être réduites grâce à des dispositifs de protection appropriés.

La puissance du signal reçu par les profileurs décroît en général avec la hauteur de mesure, qui ne peut donc dépasser un certain seuil. Cette portée maximale dépend des caractéristiques des radars et croît avec le produit de la puissance moyenne de l'émetteur par l'ouverture de l'antenne, mais se heurte à une limite absolue qui est déterminée par la fréquence radar utilisée. Autrement dit, ce sont les grands profileurs stratosphériques à forte puissance qui font des mesures aux altitudes les plus élevées, bien

que pour un profileur donné, la hauteur maximale de mesure varie considérablement en fonction des conditions météorologiques ; les données recueillies peuvent présenter des lacunes aux basses altitudes en certaines occasions.

Vu qu'il importe d'effectuer des mesures jusqu'à des altitudes aussi élevées que possible, les profileurs recueillent des données pendant plusieurs minutes de manière à intégrer les signaux de faible puissance obtenus. En général, un profileur met six ou douze minutes pour effectuer les trois séries d'observations requises pour mesurer la vitesse du vent. De nombreux profileurs combinent ces séries d'observations pour fournir une mesure toutes les heures.

Étant sensibles aux échos très faibles causés par les hétérogénéités de l'atmosphère, les profileurs peuvent aussi détecter des signaux renvoyés par les aéronefs, les précipitations, les oiseaux et les insectes. En général, ces signaux provoquent des confusions qui risquent de conduire à des vitesses du vent erronées. Dans ces circonstances, il sera procédé à une comparaison ou à une combinaison d'un certain nombre de mesures indépendantes pour donner une idée de la cohérence des valeurs obtenues ou bien pour écarter les valeurs suspectes.

Dans les bandes de 1000 et 400 MHz, l'influence des précipitations risque d'être plus grande que celle des hétérogénéités de l'indice de réfraction. Il en résulte que la vitesse verticale mesurée est pondérée par la réflectivité et n'est donc pas utilisable en exploitation.

Les grands profileurs stratosphériques coûtent cher et se caractérisent par un réseau d'antennes étendu (en général 100 m sur 100 m) et des émetteurs d'assez grande puissance. Du fait de leurs dimensions, il est parfois difficile de trouver des emplacements appropriés, tandis que leur résolution verticale et leur portée minimale excluent certaines applications. Leurs avantages résident dans le fait qu'ils peuvent effectuer régulièrement des mesures du

<i>Caractéristiques du profileur</i>	<i>Stratosphère</i>	<i>Troposphère</i>	<i>Basse troposphère</i>	<i>Couche limite</i>
Fréquence (MHz)	50	400	400	1 000
Puissance de crête (kW)	500	40	2	1
Portée verticale (km)	3-30	1-16	0,6-5	0,3-2
Résolution verticale (m)	150	150	150	50-100
Type d'antenne	Réseau de Yagis	Réseau de Yagis ou de brins coaxiaux colinéaires	Réseau de Yagis ou de brins coaxiaux colinéaires	Parabole ou réseau d'antenne
Taille type de l'antenne (m)	100 x 100	10 x 10	6 x 6	3 x 3
Effet de la pluie ou de la neige	Faible	Faible par pluie légère	Faible par pluie légère	Marqué

vent jusqu'à plus de 20 km de hauteur et que leurs mesures ne sont perturbées que par les pluies de très fortes intensités.

Les profileurs troposphériques qui fonctionnent dans la bande de fréquence 400-500 MHz devraient particulièrement convenir pour les mesures à l'échelle synoptique et à moyenne échelle. Leur taille est modeste et ils sont relativement peu perturbés par la pluie.

Les profileurs de la couche limite sont moins coûteux et utilisent de petites antennes. La vitesse verticale ne peut être mesurée sous la pluie, mais les gouttes augmentent la surface équivalente radar et augmentent en fait la portée verticale utile à la mesure du vent horizontal.

Les profileurs sont des systèmes actifs et l'obtention des fréquences nécessaires est très problématique dans bon nombre de pays. Toutefois, l'attribution nationale et internationale de fréquences pour les profileurs est activement poursuivie.

5.2.3 Systèmes de sondage radio-acoustique

Un système de sondage radio-acoustique (RASS) sert à obtenir le profil de la température virtuelle dans la basse troposphère. La technique utilisée consiste à suivre une brève impulsion acoustique de forte intensité qui est émise verticalement dans l'atmosphère, au moyen d'un radar Doppler hyperfréquence, situé au même point que l'émetteur. La technique de mesure repose sur le fait que les ondes acoustiques sont des ondes longitudinales qui créent des variations de densité de l'air ambiant. Ces variations provoquent des variations correspondantes de l'indice local de réfraction de l'atmosphère, qui engendrent à leur tour une rétrodiffusion de l'énergie électromagnétique émise par le radar Doppler à mesure que se propage l'onde sonore. Le radar mesure la vitesse de propagation de ces perturbations de l'indice de réfraction à mesure qu'elles s'élèvent à la vitesse locale du son. La longueur d'onde de l'onde acoustique est choisie pour correspondre à la moitié de celle du radar à hyperfréquences (condition de Bragg) de sorte que l'énergie rétrodiffusée par plusieurs ondes acoustiques s'additionne de manière cohérente au niveau du récepteur, provoquant un net accroissement de la puissance du signal de retour. La température virtuelle peut être déduite de la vitesse de propagation de l'impulsion acoustique, car elle est proportionnelle au carré de la différence entre celle-ci et la vitesse verticale de l'air.

Pour de plus amples renseignements sur cette technique amplement documentée, on peut consulter

les ouvrages de May *et al.* (1990), Lataitis (1992a, 1992b) et Angevine *et al.* (1994).

Diverses techniques expérimentales reposant sur le balayage des fréquences acoustiques pour l'obtention d'un profil de la température virtuelle ont été élaborées. On a pu mettre au point des systèmes de sondage radio acoustique par l'adjonction d'une source sonore à un profileur du type mentionné ci-dessus et par un traitement approprié du signal émis par ce dernier. Pour des fréquences radar de 50, 400 et 1 000 MHz, des fréquences acoustiques d'environ 110, 900 et 2 000 Hz sont requises. À 2 000 Hz, l'atténuation du signal acoustique limite généralement à 1 ou 2 km la portée verticale ; à 900 Hz, celle-ci peut atteindre 2 à 4 km et à 110 Hz, à condition d'utiliser de gros profileurs de 50 MHz, des portées maximales de l'ordre de 4 à 8 km peuvent être atteintes dans des conditions favorables.

Des comparaisons avec des données de radiosondage révèlent que dans de bonnes conditions, les températures virtuelles peuvent être mesurées avec une exactitude de quelque 0,3 °C pour des résolutions verticales comprises entre 100 et 300 mètres. Les opérations risquent toutefois d'être compromises en cas de vent fort et de précipitations.

La technique RASS est un moyen très prometteur d'obtenir des profils de la température virtuelle, mais il faudra procéder à de nouvelles études avant de pouvoir exploiter ces systèmes en toute confiance et de manière à répondre aux exigences des utilisateurs en matière de portée verticale, de résolution et d'exactitude.

5.2.4 Radiomètres à hyperfréquences

Le rayonnement thermique de l'atmosphère dans la bande des hyperfréquences provient essentiellement de l'oxygène, de la vapeur d'eau et de l'eau à l'état liquide et dépend de la température et de la répartition spatiale de ces éléments. Le rayonnement d'un gaz comme l'oxygène dont la densité, qui est fonction de l'altitude, est déduite de la pression en surface, nous renseigne avant tout sur la température de l'atmosphère. Les profils verticaux de la température des basses couches de l'atmosphère peuvent être établis à l'aide de radiomètres passifs à hyperfréquences basés au sol et mesurant les émissions thermiques hyperfréquences de l'oxygène dans la bande spectrale proche de 60 GHz. Les mesures spectrales dans la bande 20 - 30 GHz à l'extrême limite de la bande d'absorption de la vapeur d'eau, élargie par l'effet de pression, nous renseignent sur la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau et en eau à l'état liquide et sur la distribution verticale de la vapeur d'eau. De plus ces mesures dans les deux bandes combinées avec

les mesures infrarouge de la température de la base des nuages donnent une information sur la quantité totale et la distribution verticale de l'eau liquide. Pour de plus amples informations, voir Hogg *et al.* (1983), Westwater *et al.* (1990), Solhei *et al.* (1998), Ware *et al.* (2003) et Westwater *et al.* (2005).

Les radiomètres à balayage descendant fonctionnant à différentes fréquences, sont extrêmement sensibles à la température à certains niveaux de pression atmosphérique. Cette sensibilité en tant que fonction de la pression suit une courbe en cloche (fonction de pondération). Les fréquences des radiomètres sont choisies de telle sorte que les maxima des fonctions de pondération correspondent aux altitudes souhaitées. On calcule les profils de la température au-dessus de la couche limite par des techniques numériques d'inversion, en utilisant les mesures de rayonnement et les fonctions de pondération. Du fait de la largeur des courbes des fonctions de pondération et des radiation émises par la surface terrestre, il n'est pas possible d'obtenir des profils précis de la température à proximité de la surface et dans la couche limite, lorsqu'on utilise des radiomètres embarqués à bord d'un satellite.

Les principes des sondages radiométriques de la température et de l'humidité à partir de la surface terrestre sont bien établis. Les fonctions de pondération de la température des radiomètres profileurs à visée zénithale présentent, au voisinage de la surface, des pics étroits décroissant avec la hauteur. De plus, la sensibilité aux émissions de l'oxygène et de la vapeur d'eau n'est pas atténuée par les émissions provenant de la surface terrestre. Cela permet l'acquisition de profils de température et d'humidité avec une relativement haute résolution dans la couche limite et la basse troposphère. Les techniques d'inversion utilisées pour ces radiomètres sont basées sur la climatologie de la température et de l'humidité obtenue à partir de radiosondes au site d'observation.

Il existe une grande complémentarité entre les radiomètres installés au sol et ceux portés par des satellites. Les mesures par satellite fournissent une résolution spatiale et temporelle grossière dans la troposphère supérieure tandis que les mesures au sol donnent une haute résolution spatiale et temporelle dans la couche limite et la troposphère inférieure. Les profils récupérés à partir des radiomètres basés au sol peuvent être assimilés par des modèles numériques météorologiques pour améliorer les prévisions à court terme (1 à 12 heures) en fournissant des données sur la haute atmosphère pour les intervalles compris entre les mesures par radiosondes. Aussi, les températures brutes de brillance données par un radiomètre terrestre peuvent être assimilées directement par les modèles numériques météorolo-

giques. Cette approche améliore les résultats en évitant les erreurs inhérentes au processus de récupération du profil. Une méthode semblable utilisant, directement dans les modèles, les luminances brutes fournies par un radiomètre embarqué sur satellite a démontré, il y a quelques années, qu'elle améliorait les résultats et est largement utilisée maintenant.

Les principaux avantages des radiomètres au sol sont leurs capacités à fournir des mesures temporelles continues et à mesurer la teneur en eau des nuages. Des mesures continues de la température, de l'humidité et de la teneur en eau des nuages de la haute atmosphère peuvent être utilisées pour améliorer les prévisions de précipitation dans l'immédiat et à court terme. Ces mesures peuvent aussi être utilisées pour détecter le développement ou le moment où se produisent des changements bien définis de température (pour les études sur les émissions de gaz, la pollution de l'air, les îlots thermiques urbains, la prévision et les avis de conditions météorologiques extrêmes) (Kadygov, and others 2003).

La fiabilité et l'exactitude des radiomètres profileurs ont été largement démontrées au cours d'opérations de longue durée aux latitudes arctiques, moyennes et tropicales (Güldner and Spänkuch, 2001 ; Liljegren and others 2005). Une opération de 13 mois avec l'équipement Radiometrics MP3000 (Gaffard and Hewison, 2003) montre que l'erreur quadratique moyenne (RMS) entre la température observée par une radiosonde et celle récupérée par le radiomètre hyperfréquence varie de 0,5 K (près de la surface) à 1,8 K (à la hauteur de 5 km). Le Radiometrics TP/WVP-3000 utilisé pendant 18 mois par Güldner et Spänkuch (2001) montre une erreur similaire de 0,6 K (près de la surface) à 1,6 K (à la hauteur de 7 km en été et de 4 km en hiver). Pour le profil de vapeur d'eau, cette erreur est inférieure à 1 g m⁻³ à toutes les altitudes (Gaffard and Hewison, 2003 ; Güldner and Spänkuch, 2001).

Les radiomètres profileurs terrestres montrent un avantage économique et pratique significatif chaque fois que sont requises des mesures de température, d'humidité et de teneur en eau des nuages dans la troposphère inférieure, avec une haute résolution temporelle et qu'une résolution moyenne verticale est acceptable. Les prix des radiomètres profileurs commerciaux ont considérablement chuté au cours de ces dernières années et sont maintenant inférieurs au coût annuel classique de la main d'œuvre et du matériel engagés pour une exploration biquotidienne par radiosonde.

5.2.5 Radars à laser (lidars)

L'énergie électromagnétique générée par les lasers dans le spectre visible et proche du visible

(de l'ultraviolet à l'infrarouge) est diffusée par les molécules de gaz et les particules en suspension présentes dans l'atmosphère. Cette diffusion permet d'appliquer le principe du radar pour observer l'atmosphère et ce au moyen d'un lidar (acronyme de Light Detection and Ranging : détection et télémétrie par la lumière). La diffusion optique peut généralement se subdiviser en diffusion inélastique et diffusion élastique. Lorsque la longueur d'onde du rayonnement laser diffusé par les constituants atmosphériques diffère de celle du rayon laser incident, la diffusion est dite inélastique. Le processus de diffusion inélastique le plus fréquemment utilisé dans les lidars atmosphériques expérimentaux est la diffusion Raman, qui résulte d'un échange d'énergie entre les photons incidents et l'état de rotation et de vibration des molécules diffusantes. Dans le cas de la diffusion élastique, la longueur d'onde du rayonnement incident est la même que celle du rayonnement diffusé. Cette diffusion, qui peut être de Rayleigh ou de Mie, dépend de la nature et de la taille des particules et de la longueur d'onde du rayon laser incident (voir le chapitre 9, partie II). Ces deux processus majeurs de diffusion peuvent avoir lieu simultanément dans l'atmosphère.

Pour de plus amples renseignements, voir Hinkley (1976), Thomas (1991), Syed Ismael et Bro-well (1994) et le Rapport N° 12 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation WMO (1982).

La majorité des lidars sont exploités en mode monostatique, c'est-à-dire que le récepteur est situé au même point que l'émetteur laser. Le système lidar type comporte une source laser pulsée qui envoie dans l'atmosphère des impulsions de lumière cohérente. La puissance moyenne des lasers utilisés varie de quelques milliwatts à plusieurs dizaines de watts. Un télescope optique adjacent au laser intercepte l'énergie rétrodifusée. La lumière reçue par le télescope est focalisée sur une cellule photomultipliatrice ou une diode photosensible. L'information reçue s'affiche habituellement sur un tube cathodique permettant une surveillance en temps réel avant d'être transmise à un ordinateur pour une analyse plus détaillée.

La force du signal de retour dépend à la fois de la quantité d'énergie diffusée par la cible et de l'atténuation, à l'aller et au retour, de cette énergie entre le lidar et la cible. Cette atténuation dépend de la part de l'énergie du faisceau qui s'en échappe par diffusion et de son absorption par les gaz atmosphériques. Les processus de diffusion et d'absorption sont exploités dans différents lidars qui fournissent ainsi tout un éventail de mesures.

Les lidars dont le fonctionnement repose sur le principe de la diffusion élastique (lidars Rayleigh ou Mie ou tout simplement lidars) sont surtout utilisés pour l'étude des nuages et des particules. Ils mesurent de façon très directe la hauteur de la base des nuages : la brusque hausse d'intensité du signal qui correspond à sa réflexion par la base des nuages est facilement discernable et la durée du trajet d'une impulsion laser entre l'émetteur et la base des nuages et entre celle-ci et le récepteur permet de déterminer la hauteur de la base des nuages (voir le chapitre 15, partie I).

Les lidars servent aussi à détecter les particules en suspension dans un air relativement limpide et à établir une cartographie de certaines caractéristiques structurelles de l'atmosphère comme la stabilité thermique et les hauteurs d'inversion. Les particules naturellement présentes dans les basses couches de l'atmosphère sont suffisamment nombreuses pour que les lidars puissent mesurer en permanence la vitesse du vent en l'absence de précipitations, comme les radars météorologiques. Ils servent par ailleurs à établir une cartographie et à mesurer la concentration des particules liées aux activités humaines, comme celles qui sont rejetées par les cheminées d'usines.

Les observations effectuées au moyen du lidar ont apporté une contribution capitale et exceptionnellement documentée à l'étude de la teneur de la stratosphère en aérosols, fortement influencée par les grandes éruptions volcaniques et facteur important du bilan radiatif mondial.

Il est bien plus difficile d'obtenir des données quantitatives sur les nuages à cause des variations de la forme et de la distribution des gouttelettes ainsi que de la teneur en eau des nuages, à cause des problèmes de distinction entre l'eau, la glace et les structures mixtes et à cause des propriétés des aérosols et des particules en suspension. Il faut recourir pour cela à des systèmes de recherche complexes qui mesurent plusieurs paramètres à la fois, qui reposent sur des hypothèses concernant les propriétés optiques du milieu considéré et qui utilisent des méthodes mathématiques complexes de réduction des données.

Le lidar à absorption différentielle repose sur le principe selon lequel le coefficient d'absorption des gaz atmosphériques varie fortement en fonction de la longueur d'onde. Ce type de lidar utilise en général un laser qui peut être accordé à deux fréquences proches, l'une fortement absorbée par un gaz particulier et l'autre non. Les différences constatées dans les mesures en fonction de la distance peuvent servir à évaluer la concentration du gaz considéré. Cette technique de télédétection ouvre des perspec-

tives très prometteuses en ce qui concerne la mesure de la composition de l'atmosphère et a été utilisée avec succès pour mesurer les concentrations en eau, dioxyde de souffre, dioxyde d'azote et, en particulier, la concentration d'ozone.

L'utilisation de l'effet Raman présente un intérêt particulier du fait qu'il se caractérise par un décalage de fréquence du rayonnement diffusé dont la valeur dépend de la nature des molécules rencontrées (courbes de Stokes). La puissance du signal rétrodiffusé est fonction de la concentration de ces molécules. Les lidars Raman ne nécessitent pas une longueur d'onde particulière ou un laser accordé : les longueurs d'onde du laser peuvent être sélectionnées dans une région du spectre où il n'y a pas d'absorption atmosphérique. En mesurant le spectre Raman on peut obtenir des mesures, localisées dans l'espace, de constituants atmosphériques présélectionnés, mesures qui ont permis d'établir des profils troposphériques de la vapeur d'eau, de l'azote et de l'oxygène ainsi que de constituants minoritaires de l'atmosphère. Les principaux inconvénients de cette méthode sont le manque de sensibilité sur de longues portées (les sections efficaces de diffusion étant restreintes) et la nécessité d'utiliser des lasers de grande puissance qui peuvent se révéler dangereux pour les yeux.

Les systèmes lidars ont fourni une foule d'informations utiles pour la recherche mais leur utilisation en tant qu'outil opérationnel est plutôt restreinte. Ces systèmes coûtent en effet relativement cher et leur mise au point, leur installation et leur exploitation nécessitent un personnel hautement qualifié. En outre, certains lidars ne peuvent fonctionner que dans des conditions bien déterminées, telles que l'obscurité ou l'absence de précipitations.

5.3 MESURES IN SITU

5.3.1 Poursuite de ballons

Ce procédé est fréquemment utilisé pour la mesure des vents dans la couche limite. Pour suivre le ballon, on utilise d'ordinaire des théodolites optiques ou bien un radar de poursuite (pour une description plus générale des méthodes de mesure du vent, voir le chapitre 13, partie I).

Pour effectuer des sondages dans la basse troposphère, il est préférable que la vitesse ascensionnelle du ballon soit faible de manière à obtenir des mesures à des niveaux plus rapprochés. Pour cela, il suffit d'équiper le ballon d'un parachute de freinage ou de réduire sa force ascensionnelle nette.

Lorsqu'on utilise un radar de poursuite, un petit réflecteur est suspendu au ballon. Dans la basse troposphère, le radar doit être capable de détecter une cible à très courte distance, soit dès une centaine de mètres et le point de lancement du ballon se trouver, de préférence, sous son vent, au-delà de cette distance minimale.

On peut faire une mesure approximative du vent en utilisant un seul théodolite optique, mais pour obtenir des données suffisamment exactes, il convient de faire appel à la méthode dite à deux théodolites, la ligne de base entre les deux instruments devant avoir une longueur supérieure à un kilomètre. Pour faciliter l'exécution des sondages et garantir l'exactitude des hauteurs observées, il faudrait équiper les théodolites d'interfaces permettant d'enregistrer les données dans un ordinateur qui effectuerait les calculs requis dans les délais voulus. Si les conditions météorologiques sont favorables, il est possible de déterminer les profils du vent jusqu'à une altitude de 3000 mètres. Cette technique échoue toutefois lorsque les conditions sont défavorables (précipitations, nuages bas ou brouillard).

Il est naturellement possible de collecter des données supplémentaires sur le vent dans les basses couches avec des radiosondes ordinaires en effectuant des relevés de position plus fréquents (2 à 10 par minute) durant les premières minutes d'un sondage complet normal.

5.3.2 Radiosondes pour la couche limite

Les systèmes de radiosondage ordinaires sont décrits en détail dans le chapitre 12, partie I. Des radiosondes spéciales ont été conçues pour effectuer des observations plus détaillées de la couche limite et de la basse troposphère. Elles diffèrent des radiosondes ordinaires en ce sens qu'elles sont munies de capteurs plus sensibles et qu'elles permettent d'effectuer des mesures plus fréquentes. Ces radiosondes servent en général à déterminer les profils de la température, de l'humidité et du vent dans la couche comprise entre la surface et une altitude d'environ 3 à 5 km.

On s'arrange généralement pour maintenir la vitesse ascensionnelle de ces radiosondes dans des limites comprises entre 150 et 200 mètres par minute, vitesse plus faible que celle des radiosondes ordinaires, ce qui permet d'obtenir des profils verticaux plus détaillés. La vitesse ascensionnelle est normalement déterminée par le choix d'un ballon aux dimensions appropriées mais peut être modifiée par l'utilisation d'un parachute monté à l'envers.

Vu que ces instruments ne sont appelés à atteindre qu'une altitude limitée, ils peuvent être générale-

ment transportés par un ballon-pilote. Le déroulement du sondage est par ailleurs très similaire à celui d'un sondage ordinaire et les données se traitent à peu près de la même façon.

Lorsque l'altitude du sondage n'excède pas 2000 mètres, on peut parfois se passer des capteurs de pression, ce qui rend la sonde plus simple et moins coûteuse. Des systèmes plus simples encore, qui ne mesurent que la température, sont également disponibles.

Les exigences fondamentales à satisfaire par les radiosondes utilisées pour la couche limite sont les suivantes :

Variable	Intervalle de mesure	Résolution
Pression	1 050 à 500 hPa	$\pm 0,5$ hPa
Température	+ 40° à – 40 °C	$\pm 0,1$ K
Humidité	100 à 20 (ou 10) %	± 2 %
Vitesse du vent	0,5 à 60 m s ⁻¹	$\pm 0,5$ m s ⁻¹
Direction du vent	0° à 360°	± 5 °

Ces mesures devraient être effectuées au moins toutes les 30 secondes afin de fournir une résolution verticale de 50 à 100 m.

5.3.3 Tours et mâts équipés d'instruments

Les tours et les mats spécialement équipés d'instruments sont utilisés à diverses fins, et notamment pour l'étude de la diffusion des polluants dans l'atmosphère. À cet égard, il convient de se référer à Panofsky (1973).

Pour certaines applications, les tours peuvent atteindre 100 m de haut, et pour les travaux de surveillance de la pollution et de lutte contre celle-ci, elles devraient dépasser d'au moins 50 m les sources importantes de polluants.

Les mesures de la température, de l'humidité et du vent devraient se faire à plusieurs niveaux (deux ou trois au minimum). Le niveau le plus bas devrait être à la même hauteur qu'un abri météorologique ordinaire installé à proximité de la tour ou du mat. Le nombre des niveaux dépend des tâches à accomplir et de la hauteur du mat ou de la tour ; n'en utiliser que deux limite considérablement l'intérêt des mesures du fait qu'elles ne donnent alors aucune information sur la forme des profils verticaux des variables météorologiques. On utilise habituellement plus de niveaux pour les travaux de recherche que pour les travaux d'exploitation courante.

Les données sont d'ordinaire traitées et présentées automatiquement en même temps que les renseignements sur les différences entre les niveaux fournis en vue de caractériser les conditions météorologiques. Lorsqu'elles doivent être exploitées directement par des profanes (non météorologues), par exemple le personnel chargé de maintenir les concentrations de polluants atmosphériques en dessous des seuils critiques, elles font souvent l'objet d'un complément de traitement par ordinateur destiné à en extraire des indications facilement applicables à la tâche considérée.

Les capteurs les plus couramment employés sur les tours ou sur les mâts sont les suivants :

- (a) température : thermomètres à résistance électrique ou à thermocouple, sous abris ventilés artificiellement ou non ;
- (b) humidité : psychromètres, capteurs électrochimiques ou électromagnétiques sous abris ;
- (c) vent : girouettes, anémomètres à coupelles, à pales, soniques ou à fil chaud.

Tous les capteurs devraient avoir des réponses linéaires ou linéarisées et une constante de temps suffisamment faible pour que les données collectées représentent convenablement les fluctuations locales des variables météorologiques.

Il est important que la structure de la tour ou du mat n'affecte pas indûment les capteurs et leurs mesures. Si la structure est ouverte, les capteurs doivent être montés sur des perches, fixes ou rétractables, d'une longueur d'au moins deux mètres et, de préférence, suffisante pour les maintenir écartés de la tour ou du mat d'une distance égale à au moins dix fois le diamètre de ces derniers. Si la structure est pleine ou si l'emploi de perches aussi longues est impossible, il faut installer à chaque niveau, des deux côtés de la tour ou du mat, des perches qui en écartent les capteurs d'une distance au moins égale à trois fois le diamètre de la structure ; les mesures instantanées se font alors avec les capteurs exposés du côté où le vent n'est pas perturbé.

Dans des cas spéciaux, on utilise parfois des tours afin d'établir des profils verticaux en y installant non des capteurs à poste fixe, mais un dispositif de sondage simplifié conçu de la manière suivante : une boucle de cordage fermée, actionnée par un treuil à main ou à moteur et passant dans une poulie fixée le plus haut possible, sert à hisser ou à redescendre une radiosonde aux niveaux souhaités. La radiosonde, qui est modifiée par l'ajout de capteurs de vent, transmet ses données à un récepteur au sol. On peut ainsi obtenir des profils plus détaillés qu'au moyen d'une installation de perches et déterminer l'altitude des particularités

importantes. Par contre, avec ce système, des observations prolongées ne sont possibles qu'à un seul niveau.

Dans certaines conditions météorologiques la tour n'est pas assez haute pour permettre de déterminer exactement l'étendue de la couche où les polluants se dispersent. En ce cas, à moins qu'il n'existe dans un rayon maximal de 50 kilomètres une station de radiosondage capable de fournir les informations nécessaires, la station où est érigé le mât ou la tour devrait disposer d'un équipement spécial autorisant l'exécution de sondages locaux jusqu'à une altitude d'environ 3000 mètres. Indépendamment de leur destination principale, ces données de sondage peuvent compléter celles provenant du réseau aérologique de base et servir aussi à l'étude plus fouillée de phénomènes météorologiques locaux.

Il faut faire vérifier périodiquement les équipements de mesure des tours par des spécialistes hautement qualifiés, qui devraient contrôler tout spécialement l'état et le fonctionnement des capteurs, des enregistreurs et de l'ensemble des câbles, prises et connexions exposés aux intempéries.

5.3.4 Ballons captifs transportant des instruments

Les applications typiques des ballons captifs comprennent la détermination des profils de la température, de l'humidité et du vent (ainsi que de leurs fluctuations sur de courtes périodes) depuis la surface jusqu'à une altitude d'environ 1500 m, et l'étude à long terme des conditions météorologiques à un ou plusieurs niveaux déterminés. Les capteurs nécessaires sont placés dans une ou plusieurs nacelles suspendues au ballon ou fixées au câble d'amarrage. Leurs indications sont en général transmises au sol soit par radio, soit par des conducteurs incorporés au câble qui retient le ballon. Les techniques en question sont décrites par Thompson (1980).

Ces systèmes utilisent soit des ballons de grande taille (600 m³ environ), soit des ballons de petite taille (10 à 100 m³ environ). Les plus petits servent en général à obtenir des profils tandis que les grands permettent d'effectuer des mesures à des niveaux multiples. Les ballons captifs doivent avoir une faible traînée et une ascension régulière, et sont normalement gonflés à l'hélium. Les ballons les plus gros devraient être capables d'emporter, en plus du câble d'amarrage, une charge de 50 kg à 1 500 mètres d'altitude et demeurer utilisables par des vitesses du vent allant jusqu'à 5 m s⁻¹ en surface et 15 m s⁻¹ aux altitudes où ils sont appelés à monter. Le câble d'amarrage devrait pouvoir résister sans rompre à une traction de 2 000 à 3 000 kg (200 à 300 kg pour les ballons de petite taille).

Les réglementations nationales relatives à la sécurité aérienne s'appliquent aux ascensions de ballons captifs. Il est pour cette raison, et aussi parce que cela facilite la tâche du personnel d'exploitation, vivement recommandé d'utiliser des ballons de couleur voyante et équipés de feux qui les rendent bien repérables la nuit. La présence d'un dispositif automatique permettant de les dégonfler rapidement est obligatoire, celle d'un réflecteur radar accroché aux suspentes est facultative.

Les principaux facteurs limitants pour l'exploitation d'un ballon captif sont une forte vitesse du vent en altitude, la turbulence à proximité de la surface et le risque de foudre.

Le treuil qui sert à manœuvrer le ballon peut être actionné soit à la main, soit par un moteur électrique. Il devrait autoriser au moins deux vitesses d'enroulement/déroulement du câble (par exemple, 1 et 2 m s⁻¹), comporter un frein à main, un compteur de longueur de câble et un dispositif de contrôle de la tension de ce dernier et, qu'il soit actionné électriquement ou non, être protégé contre les décharges atmosphériques par une prise de terre.

Employer des conducteurs pour acheminer les signaux jusqu'au sol n'est pas une bonne solution à plusieurs égards. Il est en effet préférable d'utiliser des radiosondes spéciales, à résolution plus fine que les radiosondes normalement utilisées pour les sondages libres. Les capteurs de température et d'humidité doivent être munis d'un écran horizontal qui les protège du rayonnement solaire et de la pluie tout en leur assurant une ventilation convenable. Il faut leur adjoindre des capteurs supplémentaires pour la mesure de la vitesse et de la direction du vent.

Les exigences fondamentales à saisir sont résumées dans le tableau suivant :

Variable	Intervalle de mesure	Résolution
Pression	1 050 à 850 hPa	± 0,5 hPa
Température	+ 40° à – 20 °C	± 0,1 K
Humidité	100 à 20 (ou 10) %	± 2 %
Vitesse du vent	0,5 à 15 m s ⁻¹	± 0,5 m s ⁻¹
Direction du vent	0° à 360°	± 1°

Il est possible de recourir pour la transmission des signaux à n'importe laquelle des fréquences allouées normalement aux radiosondes, mais le choix se porte souvent sur la bande de 400 MHz. Le poids maximal des équipements de mesure et de transmission (y compris la batterie) devrait demeurer largement inférieur à celui que le ballon est capable d'empor-

ter, une charge de 5 kg représentant une limite raisonnable. La radiosonde devrait être suspendue au-dessous du ballon à une distance au moins égale à trois fois le diamètre de celui-ci, de telle façon qu'elle conserve la stabilité voulue pour que les capteurs restent bien protégés par leur écran et soient convenablement ventilés.

La vibration du câble et les mouvements du ballon constituent un problème majeur lorsqu'on veut passer de la mesure de valeurs moyennes à celle de la turbulence. Des techniques spéciales doivent être employées à cette fin.

L'équipement au sol doit comprendre un récepteur et un enregistreur. Les données sont généralement traitées au moyen d'un petit ordinateur.

Les sondages peuvent s'effectuer pendant la montée et la descente du ballon soit en continu, soit avec des pauses à des niveaux choisis. Pour les niveaux les plus bas, il est possible d'estimer la hauteur d'après la longueur de câble déroulée, mais, pour les niveaux plus élevés, ceci ne donne que des indications approximatives et l'on doit faire appel à une autre méthode. Cette méthode consiste en calculs opérés à partir de l'équation hydrostatique et des distributions observées de la pression, de la température et de l'humidité. L'incrément en mètres géopotentiels entre les niveaux n et $n + 1$ est ainsi donné par :

$$29.27 T_v \ln(p_n / p_{n+1})$$

où T_v est la température virtuelle moyenne entre les niveaux n et $n + 1$, tandis que p_n et p_{n+1} sont les pressions correspondantes. Si on a besoin de convertir les mètres géopotentiels en mètres géométriques, ce qui

arrive rarement, on le fait aisément avec les tables météorologiques du Smithsonian Institute. C'est la hauteur du baromètre de la station qui sert de niveau de référence dans les calculs.

Lorsque les variables météorologiques sont observées niveau par niveau, il faudrait effectuer à chaque niveau plusieurs cycles de mesures, en attendant entre chacun d'eux que les lectures des instruments se stabilisent (deux à trois minutes). L'ensemble du sondage exigera ainsi une demi-heure à une heure. Comme pour tous les autres sondages, il faudrait comparer dans un abri de contrôle, immédiatement avant le début et après la fin des opérations, les indications fournies par les instruments de la radiosonde avec celles d'un baromètre et d'un psychromètre à aspiration. De même, comme pour tous les autres sondages, il faudrait se procurer les données au niveau de la station au moyen non de la radiosonde, mais d'instruments classiques installés dans un abri ordinaire.

Les données du radiosondage devraient être, à chaque niveau, les moyennes des valeurs mesurées de la pression, de la température et de l'humidité et, en ce qui concerne la vitesse du vent, sa moyenne calculée sur une période de 100 ou 120 secondes. Si la direction du vent n'est pas mesurée directement, on peut l'estimer grossièrement (c'est-à-dire avec une incertitude de $\pm 30^\circ$) en déterminant l'orientation de l'axe longitudinal du ballon par rapport au nord.

Il importe de souligner qu'avant de procéder à tout sondage ou série de sondages par ballon captif les responsables de l'opération doivent en informer les services de la navigation aérienne et obtenir leur autorisation.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Adachi, A., T. Kobayashi, K.S. Gage, D.A. Carter, L.M. Hartten, W.L. Clark and M. Fukuda, 2005 : Evaluation of three-beam and four-beam profiler wind measurement techniques using a five-beam wind profiler and collocated meteorological tower. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22, pp. 1167–1180.
- Angevine, W.M., W.L. Ecklund, D.A. Carter, K.S. Gage and K.P. Moran, 1994 : Improved radio acoustic sounding techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 11, Issue 1, pp. 42–49.
- Brown, E.H. and F.F. Hall, 1978 : Advances in atmospheric acoustics. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Volume 16, pp. 47–109.
- Derr, V.E., 1972 : *Remote Sensing of the Troposphere*. United Nations National Oceanic and Atmospheric Administration, WPL, Boulder, Colorado.
- Gaffard, C. and T. Hewison, 2003 : Radiometrics MP3000 microwave radiometer trial report. *Technical Report -TR26*, Met Office, Workingham, Berkshire, UK, 27 pp.
- Gaynor, J.E., C.B. Baker and J.C. Kaimal, 1990 : *The international sodar intercomparison experiment. Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*. McGraw-Hill, New York, pp. 67–74.
- Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983 : *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Elsevier, Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- Güldner, J. and D. Spänkuch, 2001 : Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 925–933.
- Hinkley, E.D., 1976 : *Laser Monitoring of the Atmosphere: Topics in Applied Physics*. Volume 14, Springer Verlag, New York.
- Hogg, D.C., M.T. Decker, F.O. Guiraud, K.B. Earnshaw, D.A. Merritt, K.P. Moran, W.B. Sweezy, R.G. Strauch, E.R. Westwater and C.G. Little, 1983 : An automatic profiler of the temperature, wind and humidity in the troposphere. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 22, pp. 807–831.
- Kadygrov, E.N. and D.R. Pick, 1998 : The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations. *Meteorological Applications*, Volume 5, pp. 393–404.
- Kadygrov, E.N., G.N. Shur and A.S. Viazankin, 2003 : Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing, *Radio Science*, Volume 38, No. 3, pp. 13.1–13.12.
- Lataitis, R.J., 1992a : Signal power for radio acoustic sounding of temperature: The effects of horizontal winds, turbulence and vertical temperature gradients. *Radio Science*, Volume 27, pp. 369–385.
- Lataitis, R.J., 1992b : *Theory and Application of a Radio-acoustic Sounding System*. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230.
- Liljegren, J.C., S.A. Boukabara, K. Cady-Pereira and S.A. Clough, 2005 : The Effect of the half-width of the 22-GHz water vapor line on retrievals of temperature and water vapor profiles with a 12-channel radiometer, *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, Volume 43, Issue 5, pp. 1102–1108.
- Martner, B.E., D.B. Wuertz, B.B. Stankov, R.G. Strauch, E.R. Westwater, K.S. Gage, W.L. Ecklund, C.L. Martin and W.F. Dabberdt, 1993 : An evaluation of wind profiler, RASS, and microwave radiometer performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 74, Issue 4, pp. 599–613.
- May, P.T., R.G. Strauch, K.P. Moran and W.L. Ecklund, 1990 : Temperature sounding by RASS, with wind profiler radars : A preliminary study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 28, Issue 1, pp. 19–28.
- Neff, W.D. and R.L. Coulter, 1986 : Acoustic remote sounding. In Lenschow, D.H. (ed.) : *Probing the Atmospheric Boundary Layer*, American Meteorological Society, pp. 201–236.
- Panofsky, H.A., 1973 : Tower micrometeorology. In Haugen, D.A. (ed.) : *Workshop on Micrometeorology*, Chapter 4, American Meteorological Society.
- Singal, S.P., 1990 : Current status of air quality related boundary layer meteorological studies using sodar. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*, McGraw-Hill, New York, pp. 453–476.
- Solheim, F., J.R. Godwin, E.R. Westwater, Y. Han, S.J. Keihm, K. Marsh and R. Ware, 1998 : Radiometric profiling of temperature, water vapor, and cloud liquid water using various inversion methods, *Radio Science*, Volume 33, pp. 393–404.
- Strauch, R.G., and others, 1990 : Preliminary evaluation of the first NOAA demonstration network wind profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 7, Issue 6, pp. 909–918.
- Syed Ismael and E.V. Browell, 1994 : Recent Lidar technology developments and their influence on measurements of tropospheric water vapor. *Journal*

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

of Atmospheric and Oceanic Technology, Volume 11, Issue 1, pp. 76–84.

- Thomas, L., 1991 : Lidar probing of the atmosphere. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, Volume 20, pp. 368–380.
- Thompson, N., 1980 : Tethered balloons. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds) Chapter 31, Plenum Press, New York.
- Ware, R., R. Carpenter, J. Güldner, J. Liljegren, T. Nehrkorn, F. Solheim and F. Vandenbergh, 2003 : A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid, *Radio Science*, Volume 38, pp. 8079–8032.
- Weber, B.L. and D.B. Wuertz, 1990 : Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 7, Issue 1, pp. 157–174.
- Westwater, E.R., J. B. Snider and M.J. Falls, 1990 : Ground-based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65, and 90.0 GHz : A comparison of measurements and theory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume 38, Issue 10, pp. 1569–1580.
- Westwater, E., S. Crewell, C. Mätzler and D. Cimini, 2005 : Principles of Surface-based Microwave and Millimeter Wave Radiometric Remote Sensing of the Troposphere. *Quaderni Della Società Italiana di Elettromagnetismo*, Volume. 1, No. 3.
- World Meteorological Organization, 1980 : *Lower Tropospheric Data Compatibility: Low-level Intercomparison Experiment (Boulder, United States, 1979)*. Instruments and Observing Methods Report No. 3, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1982 : *Indirect Sensing: Meteorological Observations by Laser Indirect Sensing Techniques* (A.O. Van Gysegem). Instruments and Observing Methods Report No. 12, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1994 : Comparison of windprofiler and rawinsonde measurements (J. Neisser, V. Görsdorf and H. Steinhagen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)*, Instruments and Observing Methods Report No. 57, WMO/TD-No. 588, Geneva.
- World Meteorological Organization, 2006 : Operational Aspects of Different Ground-Based Remote Sensing Observing Techniques for Vertical Profiling of Temperature, Wind, Humidity and Cloud Structure (E.N. Kadygrov). Instruments and Observing Methods Report No. 89, WMO/TD n° 1309.

CHAPITRE 6

MESURES EFFECTUÉES DANS LA STRATOSPHÈRE ET LA MÉSOSPHERE À L'AIDE DE FUSÉES¹

6.1 GÉNÉRALITÉS

Il sera essentiellement question dans ce chapitre des mesures du vent et de la température réalisées au moyen de petites fusées météorologiques. Les données relatives au vent sont obtenues au moyen d'un radar qui suit la chute d'un dispositif de détection effectuant des observations in situ. Ce dispositif peut comporter des capteurs de température dont les mesures sont transmises à une station terrestre. Les techniques décrites dans ces pages concernent les observations menées dans la stratosphère et la mésosphère, soit à des altitudes situées généralement entre 20 et 90 kilomètres.

Les systèmes de mesure placés à bord des fusées-sondes météorologiques comprennent les éléments de base suivants :

- a) un instrument éjecté de la fusée près de son altitude maximale (apogée), qui descend ensuite muni d'un dispositif ralentisseur semblable à un parachute et qui transmet au sol les mesures de la température, tandis que l'on obtient des renseignements sur le vent en suivant au moyen d'un radar haute précision les déplacements du ralentisseur ;
- b) un ballon gonflable à chute libre, appelé sphère à chute libre, suivi au radar haute précision pour recueillir des données sur le vent et la masse volumique de l'atmosphère ; ou,
- c) des rubans métallisés, appelés paillettes, qui sont éjectés près de l'apogée de la fusée et suivis par un radar haute précision uniquement pour la mesure des vents.

Les éléments observables sont très divers. Outre le vent et la température, qui sont les plus importants, il est possible de mesurer le rayonnement solaire, les variables électriques, la turbulence et les constituants chimiques, dont l'ozone, la vapeur d'eau, les oxydes d'azote, l'oxygène et l'hydrogène atomiques, le chlore et le radical hydroxyle.

Le Centre mondial de données-A (CMD-A) se charge de la collecte et des différents échanges de données. Il est ainsi possible de réaliser des études systématisques portant notamment sur la circulation générale, les relations entre le Soleil et la haute atmosphère,

la corrélation entre le géomagnétisme et les paramètres météorologiques, la composition des atmosphères types, la vérification des données satellitaires et le réchauffement de la stratosphère. Un message ROCOB est établi et diffusé par l'intermédiaire du Système Mondial de Télécommunications lors de chaque lancement.

Les techniques de mesure évoluent constamment, tant sur le plan des méthodes employées que des éléments observés. Dans la plupart des cas, on recueille des données de manière irrégulière à un seul emplacement. Seules les mesures des valeurs thermodynamiques et de l'ozone sont généralisées et fréquentes; on recourt pour cela à des méthodes semi-opérationnelles. Les techniques énumérées ci-après ne seront pas décrites car elles n'entrent pas dans le cadre du sujet traité, à savoir les petites fusées-sondes météorologiques :

- a) les traceurs chimiques, par exemple le sodium ou le potassium, qui fournissent des renseignements sur le vent, la turbulence et la température ; on doit utiliser des caméras de poursuite spéciales afin de trianguler la trace chimique ;
- b) les tubes de Pitot ;
- c) les accéléromètres actifs ;
- d) les grenades acoustiques, qui émettent en explosant des ondes sonores captées par un système de microphones très sensibles situé au sol, ce qui permet d'obtenir des données sur le vent et la température. Une revue complète des travaux consacrés aux sondages par fusée météorologique se trouve dans l'étude de Bölermann (1970).

6.2 MESURE DU VENT

6.2.1 Méthodologie

Lorsque la fusée a atteint son apogée, un dispositif d'expulsion (généralement pyrotechnique) sépare la charge utile du système de propulsion. Les capteurs de mesure du vent et de la température sont déployés conjointement avec un dispositif de télémesure servant à transmettre au sol les informations sur la température. Au cours de la descente, un radar suit les déplacements du système. On détermine ainsi la trajectoire de la cible en chute, que ce soit un parachute, un système capteur de température-parachute ou un ballon gonflable. La trajectoire ob-

¹ Le contenu technique de ce chapitre n'a pas été révisé depuis la précédente édition du Guide.

tenue est généralement corrigée afin de s'assurer que les données sur le vent sont exactes. Les paillettes, qui constituent un autre mode de mesure du vent, tombent très lentement et suivent de près les mouvements du vent. Il est donc rarement nécessaire de corriger leur trajectoire. Cette méthode n'est toutefois plus utilisée régulièrement.

6.2.2 Capteurs de mesure du vent

La qualité des mesures du vent dépend de la façon dont le système de mesure réagit aux mouvements atmosphériques. Voici les facteurs qui influent sur ces réactions :

- l'inertie, les accélérations et la vitesse de chute du système de détection ;
- la stabilité dynamique et l'oscillation du dispositif de ralentissement ;
- la forme du système car elle joue sur le coefficient de résistance le long des trois axes.

6.2.3 Méthode de poursuite

Après l'éjection de la charge utile, la trajectoire de l'instrument est généralement suivie par un radar qui enregistre l'écho réfléchi par l'instrument métallisé. Cela permet de déterminer les variations du vent en fonction de la hauteur et d'obtenir les composantes de la vitesse du vent. Les angles de poursuite en azimut et en site et la distance oblique doivent présenter respectivement une exactitude de 2×10^{-4} radian (approximativement 0,011 degré) et 10 mètres environ; cela est possible en utilisant des radars ou des transpondeurs de grande qualité. Les données brutes sont recueillies à une fréquence d'au moins 10 échantillons par seconde et sont ensuite lissées par la méthode des moindres carrés, le lissage dépendant de la hauteur de la cible et la vitesse de chute.

6.2.4 Corrections et calculs du vent

On considère souvent, à tort, que le vecteur de vitesse horizontale V_p du capteur, par rapport à l'observateur, correspond à la vitesse horizontale V du vent vrai. Les vitesses d'éjection élevées, les variations du coefficient de résistance et la force d'inertie du capteur créent des écarts entre ces deux vecteurs aux altitudes supérieures à 50 kilomètres et rendent nécessaires certaines corrections, dont l'ampleur dépend de l'altitude et augmente rapidement avec l'accroissement de la vitesse de chute.

Eddy *et al.* (1965) et Ballard (1966) ont mis au point une technique de correction qui permet d'obtenir, à partir des données de poursuite, les composantes horizontales du vent à tous les niveaux, si l'on établit les hypothèses suivantes :

- le capteur n'est soumis qu'à la pesanteur et à la force de résistance de l'air ;
- la pesanteur est constante ;
- la valeur (D) de la résistance au mouvement est proportionnelle au carré de la vitesse du capteur par rapport à l'air.

La deuxième loi de Newton donne en première approximation :

$$m \frac{dV_s}{dt} = mg + D \quad (6.1)$$

$$|D| = \rho \cdot s \cdot \frac{C_d}{2} \cdot (V - V_2)^2 \quad (6.2)$$

où C_d = coefficient de résistance, g = constante de gravitation, m = masse de la charge utile en chute (c'est-à-dire cible pour la mesure du vent et/ou émetteur), S = aire transversale du capteur, t = temps, V = vitesse du vent, V_2 = vitesse de la cible, ρ = masse volumique de l'air.

Cela permet d'exprimer mathématiquement les corrections à apporter aux composantes horizontales de la vitesse du capteur de mesure du vent, Δu et Δv , pour obtenir les composantes du vecteur vent. Cette formulation est valable si la composante vent est très inférieure à la vitesse du capteur et si nous supposons que $S \cdot C_d$ est isotrope, à savoir indépendant de la direction du mouvement :

$$\Delta u = -w_s \frac{\dot{u}_s}{|\dot{w}_s - g|}; \Delta v = -w_s \frac{\dot{v}_s}{|\dot{w}_s - g|} \quad (6.3)$$

où \dot{u}_s = accélération O - E de la cible, \dot{v}_s = accélération S - N de la cible, w_s = vitesse verticale de la cible, \dot{w}_s = accélération verticale de la cible.

Ces corrections sont considérées comme importantes au-dessus du niveau auquel le capteur devient sensible au vent, c'est-à-dire lorsque la résistance au mouvement devient élevée. Cette altitude est généralement définie comme la hauteur à laquelle l'accélération verticale du capteur tombe à moins de 5 m s^{-2} (en moyenne 5 km sous l'apogée).

La valeur des termes Δu et Δv peut atteindre 100 m s^{-1} aux niveaux les plus élevés et décroître très rapidement jusqu'à moins de 1 m s^{-1} sous une altitude de 50 kilomètres. L'emploi des meilleurs radars permet d'obtenir une exactitude de trois à cinq pour cent pour les vents au-dessus de 70 kilomètres et de l'ordre de deux pour cent aux altitudes inférieures. Cette méthode de correction ne peut

tenir compte des irrégularités de comportement de la cible, lesquelles rendent alors les données douteuses.

6.3 MESURE DE LA TEMPÉRATURE PAR THERMOMÉTRIE D'IMMERSION

6.3.1 Généralités

Il existe deux méthodes permettant de mesurer la température à haute altitude au moyen de petites fusées-sondes. La première fait appel à la thermométrie d'immersion, c'est-à-dire à un dispositif de télémesure/ capteur qui est éjecté de la fusée à l'apogée, qui descend en parachute et qui mesure le vent et la température pendant la chute de la charge utile dans l'atmosphère. La deuxième consiste à employer une sphère gonflable passive qui mesure surtout les profils de la masse volumique et du vent. Les températures sont déduites du profil de la masse volumique (voir la section 6.4). Il faut suivre au radar les deux types de charges utiles afin d'obtenir des informations sur les positions. Nous étudierons ici la première de ces techniques.

6.3.2 Thermométrie d'immersion

Vu la difficulté extrême que présentent les mesures *in situ* à haute altitude, il est essentiel de choisir un type d'instrument qui réduit au minimum les corrections à apporter. On peut ainsi ignorer totalement ces corrections ou les calculer en utilisant des paramètres standard jusqu'aux niveaux les plus élevés. Importantes aux très hautes altitudes, leur emploi a été mis au point par Henry (1967) et leur valeur quantifiée par Krumins et Lyons (1972). Les corrections sont traitées plus en détail dans la section 6.3.3.

Dans ce type de mesures, les échanges d'énergie entre l'élément récepteur et le milieu ambiant deviennent rapidement très réduits aux hauteurs importantes, en raison de la faible masse volumique de l'air, tandis que les vitesses de descente rapides provoquent une variation accélérée des températures mesurées. A une hauteur de 70 kilomètres, ces vitesses varient entre 250 et 500 m s⁻¹ selon le système employé. Malheureusement, l'effet conjugué de la vitesse de chute élevée et de l'inertie thermique de la thermistance, exprimée par sa constante de temps, contribue à atténuer l'ampleur des variations de température.

Il convient donc de choisir des capteurs possédant une capacité calorifique très faible et de les placer sur un cadre qui réduit au minimum les effets de la conduction thermique. Les capteurs doivent être le

plus éloignés possible des zones soumises aux perturbations aérodynamiques causées par le corps de la charge utile et être par ailleurs insensibles aux oscillations de l'ensemble capteur-parachute responsables de la variation des effets du flux d'air incident et du rayonnement solaire direct.

On utilise trois types de capteurs présentant une variation différente de la résistance électrique en fonction de la température.

a) *Thermistance* : une thermistance sphérique, d'environ 0,25 mm de diamètre, est maintenue par deux fils fins soudés à des supports formés d'une pellicule de mylar métallisée; ces supports présentent une très faible épaisseur par rapport à leur surface afin de faciliter la dissipation thermique attribuable à la conduction provenant du corps principal de la charge utile. La résistance électrique de la thermistance augmente de manière exponentielle en fonction de la baisse de la température. A une hauteur de 70 kilomètres et à une vitesse de chute de 250 m s⁻¹, la constante temporelle de réaction est de 15 à 20 secondes et la valeur des corrections peut être de 40 à 50 K pour certains types d'instruments (Krumins et Lyons, 1972) et davantage pour d'autres (Kokin et Rusina, 1971 ; Schmidlin et al., 1980).

b) *Fil fin* : le capteur est formé d'un fil de 5 à 20 micromètres (μm) de diamètre en tungstène, en alliage tungstène-rhénium ou en alliage nickel-fer. Il est parfois recouvert d'une pellicule d'or de quelque centièmes de micromètres d'épaisseur, qui le protège de l'oxydation (un alliage or-palladium peut faire diminuer l'effet du rayonnement solaire).

On a recours à deux techniques pour réduire l'effet de la conduction thermique. La première consiste à utiliser un fil fin court (quelques centimètres) de petit diamètre, soudé à deux fils en constantan (alliage cuivre-nickel) de quelques dixièmes de micromètre de diamètre. Dans le deuxième cas, le fil fin est beaucoup plus long, son diamètre est plus important et il est soudé à des bornes dont la capacité calorifique est appréciable; il est maintenu en place à divers endroits par de très petits supports. La variation de la résistance en fonction de la température est pratiquement linéaire et de l'ordre de un ohm par 5 K dans le premier cas et de un ohm par 10 K dans le second. À une hauteur de 70 kilomètres et avec une vitesse de chute de 250 m s⁻¹, la constante de temps d'un fil fin court de cinq micromètres de diamètre est de l'ordre de la demi-seconde et la correction est d'environ 35 K; ces valeurs atteignent deux à trois secondes et à peu près

40 K quand le capteur est muni d'un fil fin long de 20 micromètres de diamètre.

- c) *Capteurs en couches* : ce type de capteur, moins fragile que les précédents, possède une inertie thermique plus grande, ce qui limite son emploi à des hauteurs inférieures à 60 kilomètres. Sur un substrat mince en nylon, un circuit électrique constitué principalement de nickel est déposé sous vide par évaporation, puis les deux faces du capteur sont recouvertes d'une pellicule d'aluminium anodisé d'une épaisseur de cinq micromètres qui permet de réduire les effets du rayonnement solaire. La variation quasi linéaire de la résistance du circuit en fonction de la température est de l'ordre de un ohm par 5 K et la constante de temps est de l'ordre de quelques secondes à 60 km.

6.3.3 Équation générale pour les corrections des capteurs de température

Si l'on connaît la température du capteur T_t , il est possible de calculer la température de l'air ambiant T_∞ . De manière générale et pour chaque type de capteur, le premier principe de la thermodynamique, ou principe de la conservation de l'énergie, veut que les variations de l'énergie à l'intérieur du système s'équilibrent par la somme de la quantité d'énergie absorbée à partir de l'environnement et de la quantité d'énergie dissipée.

Voici la formule générale :

$$mC \frac{dT_t}{dt} = A \cdot h \left[T_\infty + \frac{rV^2}{2C_p} - T_t \right] + \alpha_s \cdot J \cdot A_s + \alpha_s \cdot J \cdot Alb \cdot A_a + \sigma \alpha_1 \sum_i A_i \cdot T_i^4 - A \cdot \varepsilon \cdot T_t^4 + W_t + K_c \quad (6.4)$$

où A = surface du capteur, A_a = surface utile du capteur par rapport au rayonnement réfléchi par la surface de la Terre, A_s = surface utile du capteur par rapport au rayonnement solaire direct, A_t = surface utile du capteur exposée au rayonnement de grande longueur d'onde provenant de la Terre, de l'atmosphère et du corps principal de la sonde, Alb = albédo de la Terre et de l'atmosphère, C = chaleur spécifique du capteur, C_p = chaleur spécifique de l'air à une pression constante, h = coefficient du transfert de chaleur par convection (fonction de la masse volumique et de la vitesse de l'air par rapport au capteur, et de la température de l'air), σ = constante solaire, K_c = chaleur transmise par conduction, m = masse

du capteur, r = facteur de récupération, T_i = température équivalente du corps noir des sources émettant un rayonnement de grande longueur d'onde en direction du capteur, T_t = température du capteur, T_∞ = température de l'air non perturbé, V = vitesse de l'air par rapport au capteur, W_t = échauffement dû à l'effet Joule produit par le passage du courant de mesure et l'absorption du rayonnement électromagnétique par l'antenne émettrice, α_s = coefficient d'absorption du rayonnement solaire par le capteur, α_1 = coefficient d'absorption du rayonnement de grande longueur d'onde, ε = émissivité du capteur, σ = constante de Stefan-Boltzmann.

Le premier terme du membre droit de l'équation 6.4 représente la quantité d'énergie échangée par convection, y compris réchauffement cinétique, valeur importante au-dessus de 50 kilomètres en raison de la très grande vitesse de chute. Les deuxième et troisième termes correspondent respectivement au rayonnement solaire et au rayonnement réfléchi par la surface de la Terre et des nuages. Le quatrième est le rayonnement de grande longueur d'onde, provenant du milieu et de la sonde, qui atteint le capteur. Le cinquième terme représente l'énergie émise par le capteur en raison de son émissivité. Le sixième terme, W_t , désigne la partie de l'énergie absorbée par réchauffement dû à l'effet Joule, tandis que le septième caractérise la conduction entre le capteur et son cadre. Quant aux deux derniers, ils sont propres à chaque système et doivent être appliqués aux supports ou aux conducteurs du capteur dans le but de calculer la correction nécessaire pour la conduction. Pour plus de détails, voir Krumins et Lyons (1972), Bulanovaef al. (1967) et Yata (1970).

Les coefficients nécessaires pour le calcul des autres termes sont établis expérimentalement ou mathématiquement, selon les paramètres connus au moment du lancement. Par exemple, on détermine le coefficient h , qui est fonction de la masse volumique et de la température, à partir de valeurs normales puis, de manière plus précise, par itérations successives, en appliquant les équations générales de calcul de la température et de la masse volumique (équations 6.4, 6.8, 6.9, 6.10).

6.3.4 Télémesure

Les dispositifs de télémesure météorologique transmettent les variations de température du capteur. La résistance du capteur est généralement convertie en une fréquence qui module directement l'émetteur dans le cas de systèmes de mesure à voies multiples ou qui fait appel à un commutateur pour passer séquentiellement à trois-quatre voies, ou sous-porteuses, dans le cas de systèmes de mesure à deux ou trois voies.

Les systèmes de télémesure placés à bord de fusées sont soumis à des conditions très rudes. D'abord, la phase de propulsion est marquée par un très large éventail de fortes vibrations et par des accélérations qui peuvent atteindre quelques dizaines de g pendant plusieurs secondes. La faible masse volumique de l'air au début de la chute limite la dissipation thermique. Plus tard dans la descente, le dispositif de mesure se trouve dans une atmosphère plus dense où les températures tombent parfois à 190 K, ce qui peut refroidir les éléments électroniques.

Dans la plupart des cas, on choisit des résistances ou des tensions de référence au moyen d'un commutateur séquentiel afin de pouvoir déceler et corriger l'ensemble des erreurs provoquées par le système de mesure et, en particulier, celles liées aux altérations possibles du rendement des dispositifs de télémesure dues aux contraintes du milieu pendant le vol. Il faut apporter un soin particulier à la conception de l'antenne et à son emplacement par rapport aux capteurs dans le but d'éviter réchauffement de ceux-ci en raison de l'effet Joule causé par l'énergie électromagnétique rayonnée par l'émetteur; la puissance de l'émetteur devrait, de toute manière, être limitée au strict minimum (de 200 à 500 mW). Etant donné cette faible puissance d'émission et la grande distance séparant l'émetteur de la station réceptrice, qui peut atteindre 150 kilomètres, on emploie généralement une antenne de réception directive à gain élevé.

À la réception, après démodulation ou décodage, on enregistre les signaux sur bande magnétique multivoie avec les signaux à base de temps provenant du radar de poursuite, pour être en mesure d'affacter les données aux hauteurs correspondantes. Il est très important d'obtenir une corrélation temporelle entre les signaux de télémesure et les données de position radar.

6.4 MESURE DE LA TEMPÉRATURE AU MOYEN D'UNE SPHÈRE GONFLABLE À CHUTE LIBRE

La sphère gonflable est un simple ballon en mylar d'un mètre de diamètre doté d'un mécanisme de gonflage et dont la masse nominale est d'environ 155 grammes. Elle se déploie à une altitude de quelque 115 kilomètres, d'où elle commence à tomber en chute libre sous l'effet de la force de gravitation et du vent. Après son déploiement, la sphère est gonflée à une pression de 10 à 12 hPa par vaporisation d'un liquide, par exemple de l'isopentane. La surface du ballon est métallisée afin de recueillir les données de position radar en fonction du temps.

Pour obtenir l'exactitude voulue, il faut utiliser un radar de poursuite haute précision en bande C du type FPS-16 ou un modèle de qualité supérieure. On introduit ensuite les informations de position radar et le coefficient de résistance dans les équations du mouvement pour calculer la masse volumique de l'air et les vents. Le calcul de la masse volumique nécessite la connaissance du coefficient de résistance de la sphère dans un large éventail de conditions de flux (Luers, 1970 ; Engler et Luers, 1978). La pression et la température sont également calculées pour les mêmes valeurs d'altitude que la masse volumique. Les mesures obtenues au moyen d'une sphère ne sont touchées que par les forces physiques externes que sont la pesanteur, la résistance de l'air et les vents, ce qui les rend potentiellement plus exactes que les autres mesures *in situ* (Schmidlin, Lee et Michel, 1991).

Le mouvement de la sphère est décrit par une simple équation dans un système de coordonnées dont l'origine se situe au centre de la Terre :

$$m \frac{dV}{dt} = mg - \frac{\rho C_d A_s |V_r| \cdot V_r}{2} - \rho V_b g - 2m\omega \times V \quad (6.5)$$

où A_s = aire transversale de la sphère, C_d = coefficient de résistance, g = accélération due à la gravité, m = masse de la sphère, V = vitesse de la sphère, V_r = mouvement de la sphère par rapport à l'air, V_b = volume de la sphère, ρ = masse volumique de l'air, ω = vitesse angulaire de la Terre.

La vitesse relative de la sphère par rapport à la masse de l'air est exprimée par : $V_r = V - V_a$, où V_a est la vitesse du vent. C_d est calculé à partir de la vitesse relative de la sphère. Les termes de droite de l'équation 6.5 représentent les forces de la pesanteur et du frottement, la poussée d'Archimède et la force de Coriolis.

Après un simple traitement mathématique, l'équation 6.5 est divisée en trois composantes orthogonales, y compris la composante verticale de l'équation du mouvement à partir de laquelle on calcule la masse volumique, ainsi :

$$\rho = \frac{2m(g_z - \ddot{z} - C_z)}{C_d A_s |V_r| (\dot{z} - w_z) + 2V_b g_z} \quad (6.6)$$

où g_z = accélération due à la pesanteur au niveau z , w_z = composante verticale du vent, que l'on suppose généralement nulle, \dot{z} = composante verticale de la vitesse de la sphère, \ddot{z} = composante verticale de l'accélération de la sphère.

Les valeurs de la poussée d'Archimède ($V_b g_z$) et de la force de Coriolis (C_z) étant faibles par rapport aux autres termes de l'équation 6.7, elles sont soit ignorées, soit considérées comme des perturbations.

Le profil de la température est obtenu à partir de la masse volumique de l'air (équation 6.7) en utilisant l'équation de l'hydrostatique et l'équation d'état de la manière suivante :

$$T_z = T_a \frac{\rho_a}{\rho_z} + \frac{M_0}{R \rho_z} \int_h^a \rho_h g dh \quad (6.7)$$

où h = hauteur, variable d'intégration, M_0 = masse moléculaire de l'air sec, R = constante des gaz parfaits, T_a = température en K à l'altitude de référence a , T_z = température en K au niveau z , ρ_a = masse volumique à l'altitude de référence a , ρ_h = masse volumique à intégrer dans l'intervalle de hauteur $h-a$, ρ_z = masse volumique à l'altitude z .

Soulignons que la source de l'erreur de température est l'incertitude associée à la valeur de la masse volumique calculée précédemment. L'erreur dans la masse volumique calculée comprend les composantes de fréquence spatiale élevée et basse. La composante de fréquence élevée peut provenir de nombreuses sources, notamment d'une erreur de mesure, d'une erreur de calcul ou de la variabilité atmosphérique; elle est quelque peu aléatoire. Il est toutefois possible de réduire l'importance de l'erreur par une moyenne statistique. En revanche, la composante de fréquence basse, y compris le biais et la variation linéaire, peut être liée à des caractéristiques atmosphériques réelles et n'est pas facile à séparer de l'erreur de mesure.

6.5 CALCUL DES AUTRES VARIABLES AÉROLOGIQUES

6.5.1 Pression et masse volumique

En connaissant la température de l'air, donnée par le capteur en fonction de la hauteur, il est possible de déterminer la pression atmosphérique et la masse volumique de l'air à différents niveaux. Dans une atmosphère sèche avec un poids moléculaire constant, et en se servant de l'équation de l'hydrostatique :

$$dp = -gpdz \quad (6.8)$$

et de la loi des gaz parfaits :

$$\rho = \frac{M}{R} \cdot \frac{p}{T} \quad (6.9)$$

le rapport entre les pressions p_i et p_{i-1} aux deux niveaux z_i et z_{i-1} , entre lesquels le gradient de température est à peu près constant, peut être exprimé ainsi :

$$p_i = a_i \cdot p_{i-1} \quad (6.10)$$

où

$$a_i = \exp \left[\frac{-M}{RT_{i-1}} \cdot g_0 \left\{ \frac{r_T}{r_T + z_{i-1}} \right\}^2 \cdot \left\{ 1 - \frac{T_i - T_{i-1}}{2T_{i-1}} \right\} \{z_i - z_{i-1}\} \right] \quad (6.11)$$

et g_0 = accélération due à la pesanteur au niveau de la mer, M = masse moléculaire de l'air, P_i = pression au niveau supérieur z_i , P_{i-1} = pression au niveau inférieur z_{i-1} , r_T = rayon de la Terre, R = constante des gaz parfaits, T_i = température au niveau supérieur z_i , T_{i-1} = température au niveau inférieur z_{i-1} , z_i = niveau supérieur, z_{i-1} = niveau inférieur.

En procédant à une comparaison avec une radiosonde emportée par un ballon qui fournit une valeur de pression p , il est possible de déterminer une pression initiale p_i pour le sondage par fusée au niveau normal z_i , qui se situe généralement à près de 20 kilomètres, soit environ 50 hPa. De même, en se servant de la loi des gaz parfaits (équation 6.9), on peut établir le profil de la masse volumique ρ .

Cette méthode repose sur l'intégration pas à pas du niveau inférieur au niveau supérieur. Il est par conséquent nécessaire de posséder des données très précises sur la hauteur et la température aux différents niveaux.

6.5.2 Vitesse du son, conductivité thermique et viscosité

A partir des données de base concernant la pression et la température, on calcule souvent d'autres paramètres essentiels à l'élaboration des modèles de simulation, notamment :

a) la vitesse du son V_s :

$$V_s = \left(\gamma R \frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.12)$$

où $\gamma = C_p/C_v$;

b) le coefficient de la conductivité thermique κ de l'air en $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$:

$$\kappa = \frac{2.650 \cdot 10^{-3} \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + 2454 \cdot 10^{\frac{12}{T}}} \quad (6.13)$$

- c) le coefficient de la viscosité de l'air μ en N s m^{-2} :

$$\mu = \frac{1.458 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + 110.4} \quad (6.14)$$

6.6 RÉSEAUX ET COMPARAISONS

À l'heure actuelle, un ou deux pays seulement effectuent des sondages réguliers dans la haute atmosphère. La réduction des exigences opérationnelles et le coût élevé des mesures effectuées au moyen de fusées tendent à limiter le nombre de stations et la fréquence des lancements.

Afin d'uniformiser les résultats obtenus avec les divers systèmes utilisés, on a procédé à des comparaisons internationales à partir de Wallops Island, en Virginie, en 1968, 1972 et 1977 et à partir de Kourou, en Guyane française, en 1973 et 1977 (Finger étal, 1975 ; Schmidlin étal., 1980).

En dessous de 50 kilomètres, les données semblent assez homogènes. Entre 50 et 65 kilomètres, certains écarts apparaissent dans les mesures *in situ* effectuées par thermistance mais, en se servant des tableaux de compatibilité préparés au cours des comparaisons, il est possible d'utiliser les résultats pour des études synoptiques en corrigeant simplement les écarts systématiques.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Ballard, M. N., 1966 : The measurement of température in the stratosphère and mésosphère. Dans : *Procès-verbaux de la sixième conférence sur la météorologie appliquée (Aerospace Meteorology)*. American Meteorological Society, Los Angeles, Californie, E.-U.
- Bollermann, B., 1970 : *A Study of 30 km to 200 km Meteorological Rocket Sounding Systems*. NASA Contractor Report CR-1529.
- Bulanova, L. K., Kokin, G. A., Petrov, S. P. et Rusina, W. Ja., 1967 : *Some Results on the Methodical Treatment of the Température Measurement at High Layers of the Atmosphère Using Small Thermistors*. Trudy of the CAO, Central Aerological Observatory, Volume 77, p. 3-16.
- Eddy, A., Duchon, C. E., Hasse, F. M. et Haragan, D. R., 1965 : *Détermination of Winds from Meteorological Rocketsondes*. Report No. 2, Atmospheric Sciences Group, University of Texas, Austin, Texas, E.-U.
- Engler, N. A. et Luers, J. K., 1978 : *Modifications to the 1972 ROBIN Program*. Final report to the Atmospheric Sciences Laboratory, White Sands Missile Range, under contract DAEA18-77-C-0008, Report ASL-CR-0008-1, 45 p.
- Finger, F. G., Gelman, G. M., Schmidlin, F. J., Leviton, R. et Kennedy, B. W., 1975 : Comparability of meteorological rocketsonde data as indicated by international comparison tests. *Journal of Atmospheric Sciences*, Volume 32, p. 1705-1714.
- Henry, R., 1967 : Corrections for meteorological rocket température soundings on an individual basis. Dans : *Proceedings of the Conference on High-altitude Meteorology and Space Weather*. American Meteorological Society, Houston, Texas.
- Kokin, G. A. et Rusina, W. Ja., 1971 : *Some Results of Flight Tests of the Onboard Equipment of the Meteorological Rocket MMR-06*. Trudy, Central Aerological Observatory, Volume 90, p. 130-146.
- Krumins, M. V. et Lyons, W. C., 1972 : *Corrections for the Upper Atmosphère Températures Using a Thin-film Loop Mount*. Technical Report TR 72-152, Naval Ordnance Laboratory, 52 p.
- Luers, J. K., 1970 : *A Method of Computing Winds, Density, Température, Pressure, and their Associated Errors from the High Altitude ROBIN Sphère Using an Optimum Filter*. AFGL Contract F19628-C-0102, University of Dayton Research Institute, Air Force Report AFCRL-70-0366.
- Schmidlin, F. J., Duke, J. R., Ivanovsky, A. I. et Chernyshenko, Y. M. 1980 : *Results of the August 1977 Soviet and American Meteorological Rocketsonde Intercomparison Held at Wallops Island, Virginia*. NASA Référence Publication RP 1053. 193 pp.
- Schmidlin, F. J., Lee, H. S. et Michel, W., 1991 : The inflatable sphère: a technique for the accurate measurement of middle atmosphère températures. *Journal of Geophysical Research*, Volume 96, No. D12, 22673-22682.
- Yata, A., 1970 : Correction for the température data obtained by MT-135 System. *Geophysics Magazine* (Tokyo), Volume 35, pp 99-121.

CHAPITRE 7

LOCALISATION DES SOURCES D'ATMOSPHÉRIQUES¹

7.1 GÉNÉRALITÉS

7.1.1 Définitions

On peut définir les atmosphériques comme des ondes électromagnétiques résultant d'une décharge électrique (éclair) dans l'atmosphère. Du point de vue pratique, ce qui retient l'intérêt est ordinairement la source des atmosphériques, soit l'éclair lui-même. On considère alors l'atmosphérique comme un phénomène permettant de détecter et/ou de localiser les éclairs. La simple détection de l'occurrence orageuse suffit lorsque l'objectif visé se borne à diffuser des avis d'alerte locaux, tandis que la position de l'éclair est utile pour différentes applications météorologiques ou autres. Le terme observation des atmosphériques englobe communément la détection et la localisation.

- *Éclair intranuages* : déchargé se produisant au sein d'un nuage ou entre des nuages; ces décharges n'ont guère d'importance pratique que pour l'établissement des avis d'orages locaux.
- *Éclair nuage-sol* : type d'éclair qui importe pratiquement; appelé simplement éclair.
- *Radio goniomètre* : instrument servant à déterminer la direction d'arrivée d'un atmosphérique.
- Point : position estimée d'un éclair déduite de l'observation de ses atmosphériques.
- *Éclair* : ensemble du phénomène de décharge électrique comprenant un ou plusieurs arcs en retour (et des décharges initiatrices avant chacun d'eux).
- *Compteur d'éclairs* : instrument servant à compter le nombre d'éclairs au voisinage d'une station d'observation.
- *Multiplicité* : nombre d'arcs dans un éclair; la plupart des éclairs positifs ne comprennent qu'un seul arc.
- *Polarité* : les éclairs nuage-sol sont soit négatifs, soit positifs, selon le signe de la charge électrique qu'ils transportent du nuage au sol. les éclairs négatifs sont les plus fréquents, les éclairs positifs sont caractéristiques des conditions hivernales.

• *Portée* : rayon d'action d'un détecteur d'atmosphériques ; locale signifie ici une portée de quelques dizaines de kilomètres, régionale une portée de quelques centaines de kilomètre, longue une portée d'un à plusieurs milliers de kilomètres.

- *Sferic* : en anglais, contraction admise à des fins météorologiques du terme atmosphérique.
- *Source* : point de départ d'un atmosphérique, généralement un éclair.
- *Static* : en anglais, décharge électrique de petite échelle dans l'atmosphère; il est déconseillé de substituer ce terme à celui d'atmosphérique.
- *Arc ou arc en retour* : impulsion de courant maximal d'un éclair ; un éclair se compose d'un ou plusieurs arcs.
- *Capteur par temps d'arrivée* : instrument qui détermine avec une très grande exactitude (de l'ordre d'une microseconde) l'instant où un atmosphérique parvient au capteur.

7.1.2 Unités

Outre leur polarité et leur multiplicité, les éclairs se caractérisent par leur puissance. Celle-ci est le plus souvent définie comme la valeur maximale du courant électrique d'un arc en retour (en général la première décharge d'un éclair), mesurée en ampères (A). L'ordre de grandeur type de la puissance des éclairs est de plusieurs dizaines de kilo-ampères (kA). On peut évaluer l'intensité d'un orage d'après le nombre des éclairs dans une zone donnée, leur multiplicité moyenne, leur puissance moyenne et le rapport entre le nombre des éclairs négatifs et des éclairs positifs. Avec les techniques actuellement disponibles pour déterminer les diverses caractéristiques des orages, il serait possible de définir une mesure descriptive commode et concise («indice») de l'activité orageuse, mais un tel indice général n'existe pas encore.

La performance d'un système de détection et/ou localisation des éclairs est fonction d'un certain nombre de facteurs. Dans le cas d'un instrument destiné à l'établissement d'avis locaux, un compteur d'éclairs par exemple, ces facteurs comprennent le rayon d'action ou portée de l'instrument (ordinairement quelques dizaines de kilomètres), la proportion

¹ Le contenu technique de ce chapitre n'a pas été révisé depuis la précédente édition du Guide.

d'éclairs observés à l'intérieur du rayon d'action et la proportion de fausses alertes. Les principaux défauts dont souffre un système de localisation sont la tendance à commettre des erreurs de positionnement (habituellement de l'ordre de plusieurs kilomètres) et une efficacité de détection imparfaite (rapport, le plus souvent exprimé en pourcentage, entre le nombre des éclairs observés et le nombre réel des éclairs dans une région donnée). Les erreurs entachant l'estimation de la puissance et de la multiplicité des éclairs sont en général jugées moins critiques.

7.1.3 Besoins dans le domaine de la météorologie

La localisation des zones d'activité orageuse à l'aide de données, en temps réel plus spécialement, sur les atmosphériques fournit de précieuses informations supplémentaires aux météorologistes. Ces informations revêtent une importance particulière lorsqu'elles se rapportent à de vastes étendues maritimes ou à d'autres régions où les stations d'observation sont clairsemées. Elles peuvent aussi renseigner sur l'instabilité des masses d'air et sur la position et le mouvement des fronts, des lignes de grain, des tempêtes tropicales et des tornades, et servent à l'étude de phénomènes passés. On en trouvera des exemples dans Orville et al. (1987) et Holle, Lopez et Watson (1990).

L'assistance météorologique à l'aviation tire également profit des données sur les atmosphériques puisque les orages constituent un risque majeur pour l'aéronautique, en raison de l'intensité des déplacements d'air dont ils s'accompagnent et du fait que la foudre peut frapper et endommager les aéronefs. Il est donc possible d'améliorer les prévisions météorologiques destinées au personnel volant et au contrôle de la navigation aérienne en y incluant les tous derniers renseignements sur les atmosphériques, tandis que connaître l'emplacement des zones d'activité orageuse aide grandement à choisir une route exempte d'orage. Ceci s'applique également aux lancements d'engins spatiaux.

La foudre est aussi un phénomène dangereux pour d'autres domaines d'activités; elle risque par exemple d'endommager des installations vulnérables comme les lignes électriques aériennes, de provoquer des accidents dans les exploitations minières où l'on utilise des explosifs, ou encore de déclencher des feux de forêt. Les données sur les atmosphériques peuvent servir à fournir des avertissements appropriés aux échelles tant régionale (après avoir été interprétées par un prévisionniste) que locale (par le canal direct d'un système automatique d'alerte). Des institutions de recherche observent en outre les atmosphériques à des fins scientifiques dans plusieurs pays.

7.1.4 Méthodes d'observation

7.1.4.1 Radiogoniomètres

Les systèmes d'observation des atmosphériques les plus utilisés aujourd'hui reposent sur l'emploi de radio-goniomètres automatiques. Ceux-ci comprennent deux antennes formées de cadres orthogonaux orientés l'un dans le plan nord-sud, l'autre dans le plan est-ouest, qui permettent de déterminer la direction d'arrivée des atmosphériques à partir de ses composantes magnétiques horizontales. Les 180° restant à couvrir le sont au moyen d'une antenne plate horizontale qui capte la composante électrique verticale.

On peut utiliser isolément comme moyen d'alerte local un radiogoniomètre à bande large, détectant les atmosphériques à des fréquences allant jusqu'à un MHz. Il est cependant plus efficace de l'inclure avec deux autres ou plus dans un réseau régional destiné à localiser les éclairs en recherchant le point d'intersection des directions. La description d'un système opérationnel de ce type figure dans la section 7.2.

On a employé expérimentalement des radiogoniomètres à grande portée (700 à 4500 km) réglés à de très basses fréquences (5-10 kHz) pour cartographier les orages à l'échelle d'un continent ou même du globe (Heydt et Takeuti, 1977; Grandt et Volland, 1988). La longueur de la distance de propagation, dont l'effet sur l'impulsion dépend de la fréquence, devrait permettre d'estimer l'éloignement de la source à partir des mesures d'une seule station en comparant entre elles les composantes des atmosphériques à différentes fréquences. Il ne sera pas question ici de décrire ces systèmes, des doutes subsistant quant à la possibilité de les exploiter opérationnellement, à leur efficacité en matière de détection et à l'exactitude des résultats.

7.1.4.2 Capteurs de l'instant d'arrivée

Il est possible de déterminer la distance à laquelle se trouve la source d'un atmosphérique en mesurant l'instant d'arrivée d'une impulsion, à condition de pouvoir le faire avec une exactitude de l'ordre d'une microseconde; une telle exactitude s'impose parce que l'atmosphérique se déplace à la vitesse de 300 mètres par microseconde. Du fait qu'on ne connaît pas le moment où l'éclair s'est produit, la mesure du temps n'est que relative et pour localiser la source de l'atmosphérique il faut déterminer le décalage entre les instants d'arrivée à plusieurs stations. La synchronisation indispensable entre les stations s'opère à l'aide d'un système de datation très précis, comme ceux fournis par les satellites de navigation ou les réseaux de radiodiffusion. La durée de propa-

gation du signal des atmosphériques est moins sensible que sa direction à la diversité du relief, si bien qu'en principe un réseau d'instruments de mesure de l'instant d'arrivée devrait permettre de localiser les éclairs plus exactement qu'un réseau équivalent de radiogoniomètres. Les résultats de comparaisons effectuées entre des réseaux des deux catégories sont examinés dans le section 7.4.

Deux types de récepteurs de l'instant d'arrivée sont actuellement en service. L'un d'eux a été mis au point pour un réseau régional (Bent et Lyons, 1984); on en trouvera la description dans la section 7.3. L'autre a été conçu par Lee (1986a, 1986&, 1989) afin d'exploiter les performances à grande portée de cette technique et il est en service depuis plus de trois ans au Royaume-Uni; on en trouvera la description au paragraphe 7.3.6.

7.1.4.3 DéTECTEURS LOCAUX D'ÉCLAIRS

Les détecteurs locaux d'éclairs n'étant largement employés ni par les Services météorologiques, ni par d'autres usagers à des fins scientifiques, on possède peu d'informations sur leur marché actuel et les travaux dont leurs performances auraient été l'objet. Il y a lieu de penser que les progrès en ce domaine ont été plus lents que dans celui des systèmes de localisation et que les résultats de la comparaison à laquelle Johnson et Janota (1982) ont soumis cinq instruments restent en partie valables. L'étude des détecteurs locaux se bornera dans le présent Guide aux descriptions succinctes de cette section.

Des radiogoniomètres isolés sont utilisables comme éléments de base d'un service d'alerte. Leur plus grand avantage sur d'autres détecteurs locaux réside manifestement en ce qu'ils indiquent la direction du point d'impact des éclairs, dont on peut aussi estimer l'éloignement d'après la puissance du signal moyen d'un groupe d'éclairs. Lors de la comparaison conduite par Johnson et Janota (1982), la grande sensibilité des instruments testés et l'élimination insuffisante des signaux parasites ont été à l'origine de nombreuses fausses alarmes. Un nouvel instrument appelé détecteur d'orages est apparu sur le marché après la comparaison. Il forme l'élément de base des réseaux radiogonométriques actuels (section 7.2.1) et possède lui aussi la capacité de rejeter les éclairs autres que de nuage à sol. La situation dans un secteur délimité s'affiche sur un écran d'ordinateur avec quelques données statistiques. La portée a été fixée à 160 km. Le détecteur d'orages est utilisé assez largement par des institutions ou firmes pour lesquelles il n'est pas nécessaire et/ou serait trop coûteux d'obtenir des données régionales plus exactes sur la position des éclairs.

Les compteurs d'éclairs servent à dénombrer les décharges se produisant dans un rayon de 20 à 50 kilomètres, selon la façon dont on règle la sensibilité, ajustable, de l'instrument. Ils fonctionnent en détectant simplement les modifications rapides du champ électrique (statics en anglais), ce qui accroît leur propension aux fausses alarmes. On peut cependant réduire le taux de ces dernières en installant soigneusement le compteur à l'écart de toute source de perturbation. Les compteurs locaux d'éclairs se révèlent utiles en météorologie synoptique pour l'établissement des avis d'orage, surtout si on en combine les indications avec celles d'un radar météorologique. Leur simplicité, leur facilité d'emploi et leur bas prix en font des moyens d'alerte convenables dans tous les cas où il est souhaitable d'être averti à court terme qu'un orage approche.

Il existe un troisième type d'instruments d'alerte dont le fonctionnement repose sur la détection du puissant champ d'électricité statique associé aux nuages d'orage. L'amenuisement rapide de la puissance du champ avec la distance limite leur portée utile à 10-20 km. Le critère dont dépend l'émission de l'avertissement précoce n'est alors plus la distance où se trouve la cellule orageuse qui approche, mais le temps qui s'écoule entre le moment où le champ électrique à l'intérieur d'un nuage situé à l'aplomb ou au voisinage de la station passe de la valeur seuil d'alerte à la valeur de déclenchement du coup de foudre.

Le champ vertical d'électricité statique au niveau du sol se mesure avec un moulin à champ (condensateur à variations périodiques), une sonde radioactive (courte antenne verticale traitée de manière à rendre l'air environnant électriquement conducteur par ionisation) ou une pointe à effet corona (longue pointe effilée d'où jaillit une décharge lumineuse silencieuse lorsque la valeur du champ électrique dépasse un certain seuil). Selon Johnson et Janota (1982), l'instrument à effet corona est sensible au bruit ambiant qui provoque de fausses alarmes, et les deux autres le sont à l'action de courants de déperdition provoqués principalement par les araignées et d'autres insectes, si bien qu'ils exigent beaucoup d'entretien.

7.2 LOCALISATION DES ÉCLAIRS PAR RADIOGONIOMÉTRIE

7.2.1 Radiogoniomètres

Krider, Noggle et Uman (1976) et Maier *et al.* (1984) décrivent un système de ce type disponible dans le commerce. Il en existe de monoblocs, donc relativement faciles à installer, où les antennes et les composants électroniques ne forment qu'un tout.

Leur caractéristique la plus importante, du point de vue envisagé ici, est la capacité de détecter des atmosphériques extrêmement faibles en rejetant efficacement les signaux autres que ceux émanant d'un éclair nuage-sol. Ils les distinguent les uns des autres en analysant la forme de l'impulsion du signal et en ne l'acceptant que si elle ressemble à celle de l'arc en retour. Certaines perturbations locales non produites par des éclairs échappent parfois au tri, mais leur signal est généralement si faible que seul le radiogoniomètre le plus proche de leur source peut le détecter; il n'arrive pratiquement jamais qu'un faux éclair soit ainsi localisé car il faudrait pour cela que des signaux coïncidants reçus d'au moins deux instruments.

Le recours à la forme de l'impulsion implique que des atmosphériques provenant d'éclairs nuage-sol lointains, mais bien réels, peuvent arriver trop déformés pour que l'instrument les accepte. L'impulsion de Tonde de surface s'altère durant sa propagation au-dessus du sol et une composante légèrement retardée, réfléchie par l'ionosphère, s'y superpose. C'est pourquoi la portée nominale d'un radiogoniomètre est généralement de 400 km, distance sur laquelle les effets de l'atténuation du signal sont négligeables. L'instrument accepte cependant de nombreux éclairs bien plus distants et détecte donc des orages plus éloignés, mais les indications ainsi recueillies sur leur position et la fréquence des éclairs sont moins exactes.

Le système procure les informations numériques suivantes sur les éclairs acceptés : direction d'arrivée (angle de relèvement) et puissance du signal, polarité et multiplicité des éclairs. Ces données sont immédiatement transmises au modem habituellement connecté au processeur central du réseau.

7.2.2 Configuration du réseau

Dès lors que les observations de deux radiogoniomètres coïncident, le point d'intersection des deux relèvements donne la position de l'éclair. La localisation est en règle générale plus exacte quand les droites de position se recoupent presque perpendiculairement, tandis que les erreurs tendent à augmenter considérablement à proximité de la ligne de base entre les deux stations. Il est de ce fait préférable qu'un réseau comprenne au moins trois radiogoniomètres.

Pour que le réseau couvre la plus vaste zone possible avec un nombre minimal de radiogoniomètres, il faut que sa configuration réponde à certaines conditions. Premièrement, afin de minimiser le nombre des cas où les droites de position sont presque parallèles (ligne de base), un petit réseau doit former une figure

régulière (un triangle équilatéral s'il comprend trois radiogoniomètres, un carré s'il en compte quatre); dans un réseau plus important, il convient d'éviter que plus de deux stations se trouvent sur une même ligne droite. Deuxièmement, l'espacement entre les stations doit être assez uniforme; pour obtenir de bons résultats jusqu'à la distance imposée par la portée de 400 km, l'écart entre deux stations voisines devrait être de 150 à 250 km.

La configuration réelle du réseau dépendra en outre de la possibilité d'installer les instruments dans des sites où l'horizon ne soit pas masqué par des obstacles naturels ou artificiels, loin de toute source de perturbation et où ils seront à l'abri du vandalisme. Le choix sera aussi limité par l'obligation d'avoir accès à des circuits de télécommunications, et la présence d'un personnel qualifié peut se révéler utile bien que les radiogoniomètres ne demandent guère d'entretien.

Un point important à considérer est la redondance du réseau, c'est-à-dire le nombre des stations comparativement au minimum requis pour qu'il reste en permanence opérationnel. Les circuits de télécommunications entre les radiogoniomètres et le processeur central n'étant pas à l'abri des pannes, il vaut mieux que la zone observée le soit par au moins quatre instruments. La redondance accroît de plus l'exactitude des positionnements et l'efficacité de la détection (section 7.2.3).

Le système comporte un processeur central (analyseur de position, AP) qui reçoit les données des radiogoniomètres et calcule les positions. Si les lignes de télécommunications sont à acheminement constant, l'AP détermine les coïncidences d'après les instants d'arrivée des données; si elles fonctionnent en commutation de paquets, ce qui revient moins cher, l'AP reconstitue les indications des horloges de chaque radiogoniomètre en utilisant les informations de coïncidence fournies par les décharges orageuses observées elles-mêmes. Lorsqu'il reçoit les données coïncidentes de plus de deux radiogoniomètres, il calcule une position optimisée. L'optimisation peut consister simplement à choisir les deux droites de position les plus perpendiculaires, ou à appliquer un procédé statistique comme celui de l'ajustement par la méthode des moindres carrés (section 7.2.3).

La définition de la coïncidence entre des radiogoniomètres est fonction des conditions de bruit dans la zone couverte par le réseau. Une valeur de 20 millisecondes constitue un choix sûr, mais si l'un des radiogoniomètres ne détecte pas le premier arc et signale le deuxième à sa place, la coïncidence disparaît. Prendre un créneau de 50 ms accroît un peu

le nombre des éclairs localisés, mais le créneau doit rester inférieur à 100 ms si l'on veut éviter les fausses coïncidences.

Un réseau peut utiliser les données radiogoniométriques d'un autre. On peut par exemple améliorer les performances d'un réseau national en exploitant les indications de quelques instruments installés dans un pays voisin, et réciproquement. L'établissement de telles liaisons est une question technique non traitée ici.

7.2.3 **Exactitude des localisations et efficacité de la détection par réseau radiogoniométrique**

Les positions mesurées par les radiogoniomètres risquent d'être entachées d'erreurs angulaires dites topographiques, dues à la présence d'obstacles naturels ou artificiels aux alentours de la station d'observation. Ces erreurs varient avec la direction, de manière systématique surtout, et une fois décelées peuvent être prises en compte dans l'analyseur de position sous la forme de corrections systématiques.

Mach, MacGorman et Rust (1986) ont décrit l'une des méthodes utilisables afin de déceler les erreurs systématiques. Dans le cas d'une observation exécutée avec trois radiogoniomètres, par exemple, on calcule le point d'intersection de deux droites de position et l'on apporte à la troisième la correction voulue afin de la ramener vers ce point. On procède ainsi tour à tour avec les trois droites de chaque instruments pour l'observation considérée et on collecte un grand nombre de relevés de manière à couvrir toutes les directions et distances. Le premier passage en machine terminé, on applique les corrections partielles résultantes aux données originales et on répète les passages jusqu'à ce que les corrections convergent. Les erreurs systématiques peuvent atteindre jusqu'à 10° dans certaines directions avant l'apport des corrections.

Orville (1987) a conçu une méthode plus complexe, apparentée à l'ajustement par la méthode des moindres carrés, qu'il est facile d'adapter à un grand nombre de radiogoniomètres. On peut l'employer soit itérativement pour obtenir les corrections systématiques, soit en tant que méthode d'optimisation comportant un seul passage en machine.

Un problème se pose avec les deux méthodes précédentes : alors que les erreurs systématiques de relèvement dans chaque direction (en réalité dans des secteurs de quelques degrés) sont les valeurs moyennes pour un jeu volumineux de données, il subsiste une dispersion de caractère plus aléatoire pouvant atteindre plusieurs degrés dans certains secteurs. La méthode d'Orville est celle qui convient le mieux

pour ajuster, ou optimiser, après l'apport des corrections systématiques, les localisations définitives en minimisant de telles variations aléatoires, quelle que soit la façon dont on a déterminé les erreurs systématiques. On notera qu'une fois décelées celles-ci sont traitées comme des constantes instrumentales, tandis que l'optimisation finale découle d'un calcul effectué séparément pour chaque éclair (en temps réel ou en différé). La présence des erreurs aléatoires dans la détermination des erreurs systématiques en fausse les résultats, de sorte que l'application des méthodes de Mach et d'Orville au même jeu de données peut aboutir à des estimations différentes de l'erreur systématique.

Passi et Lopez (1989) ont proposé une solution au problème que pose le couplage des deux types différents d'erreurs. Le principe, justifiable sur le plan théorique, consiste à représenter les courbes de l'erreur systématique comme sinusoïdales à double période et coefficients inconnus, et à découpler les erreurs systématiques et aléatoires dans les équations servant à déterminer ces coefficients. Du moment où l'on a établi les courbes de correction systématique à partir d'un jeu de données anciennes représentatives, la méthode d'Orville est sans doute la plus commode pour l'optimisation des localisations finales.

Les erreurs évoquées ci-dessus proviennent de facteurs externes. Le fait que le radiogoniomètre n'accepte que les impulsions relativement bien formées implique qu'il est possible de calculer exactement la direction. Selon le fabricant, les erreurs de relèvement dues à la distorsion de l'impulsion et aux composantes non verticales du champ électrique demeurent inférieures à 1°.

Un système de localisation des éclairs se caractérise aussi par l'efficacité avec laquelle il détecte ces derniers. Lors d'une comparaison avec des données de référence au sol, Mach, MacGorman et Rust (1986) ont constaté que l'efficacité d'un système à quatre radiogoniomètres, configuration courante d'un réseau à vocation régionale, avoisinait 70 pour cent. Pour un autre système à quatre instruments, Tuomi (1991) a démontré que le nombre des éclairs localisés dépendait du nombre de radiogoniomètres utilisés. A supposer que tous les éclairs nuage-sol se produisent dans le champ d'observation nominal d'un radiogoniomètre aient des chances d'être acceptés par l'instrument, celui-ci en détectera réellement de 50 à 80 pour cent. Un système à deux instruments n'en détectera donc qu'environ la moitié et un système à trois instruments que de 70 à 80 pour cent, comme les résultats de Mach l'indiquent aussi. Il en découle qu'une fraction non négligeable, soit approximativement 10 pour cent, des éclairs nuage-sol ne sont pas détectés.

7.2.4 Maintenance d'un réseau radiogoniométrique

Il est relativement facile d'installer un réseau radiogoniométrique dès lors qu'on a trouvé des sites appropriés et établi les circuits de télécommunications nécessaires. Si le matériel est dûment protégé contre les surtensions, il est également assez fiable sur le plan technique et n'exige que très peu d'entretien.

Les principales tâches de maintenance comprennent la gestion de l'analyseur de position et le contrôle de la qualité des données. L'exploitation, c'est-à-dire l'organisation de l'affichage des données et leur transmission aux utilisateurs et aux archives, peut et devrait être automatisée, après quoi les opérations courantes se réduisent à un minimum. Plus astreignantes et plus intéressantes sont les tâches scientifiques, qui englobent non seulement l'étude physique ou météorologique des données finales, mais aussi la détermination des erreurs topographiques, l'optimisation de la localisation, le calcul de l'exactitude qui en résulte et la définition du domaine d'observation véritable en termes d'efficacité de la détection.

7.3 EXEMPLES DE SYSTÈMES DE LOCALISATION PAR LES INSTANTS D'ARRIVÉE (TOA)

Ainsi qu'il est indiqué dans la section 7.1.4.2, deux types de systèmes fondés sur la mesure de l'instant d'arrivée (TOA) sont actuellement en service; voici un exemple de chacun d'eux.

7.3.1 TOA régional

Les données d'expérience sur les réseaux TOA sont plus rares que sur les réseaux radiogoniométriques et c'est pourquoi la présente section est nettement plus courte que la précédente; on y fait surtout ressortir les analogies et les différences entre les deux systèmes.

7.3.2 Capteurs TOA

L'antenne du capteur est du type fouet ordinaire, facile à installer car il n'y a aucune précaution spéciale à prendre pour éviter la proximité d'édifices, câbles ou accidents de terrain, l'enregistreur de l'instant d'arrivée n'étant pas, comme le radiogoniomètre, sujet aux erreurs topographiques. Le récepteur numérise l'impulsion pour une période allant jusqu'à $100 \mu\text{s}$ avec une résolution de $0,2 \mu\text{s}$, détermine la polarité de la décharge et l'instant où

elle atteint son point culminant et envoie toutes ces informations au processeur central. Son horloge se recalé en permanence au moyen d'un signal extérieur provenant généralement des systèmes LORAN-C ou GPS. Il analyse séparément chaque décharge de foudre.

7.3.3 Configuration du réseau

Dans un réseau régional de localisation des éclairs, les capteurs sont disposés en lignes de base longues à des intervalles de 150 à 250 km. Des informations récentes incitent toutefois à penser que l'efficacité de la détection et l'exactitude des localisations resteraient suffisantes à certaines fins pratiques avec un espacement beaucoup plus grand. Le nombre recommandé de stations va de quatre à six. Les exigences touchant la géométrie du réseau et les circuits de télécommunications entre les stations réceptrices et le processeur central sont les mêmes que pour un réseau radiogoniométrique.

7.3.4 Exactitude des localisations et efficacité de la détection par TOA

La localisation des éclairs par TOA est en principe très précise. On parvient généralement à déterminer le pic de l'impulsion avec une erreur d'une à quelques microsecondes, ce qui correspond à une erreur spatiale d'un kilomètre ou moins. Les erreurs provoquées dans le calcul des temps de parcours par les différences entre les trajectoires de propagation sont également de l'ordre d'une microseconde. L'effet des conditions de propagation peut néanmoins provoquer des erreurs plus importantes dans la détermination de l'instant où s'amorce l'impulsion de la décharge principale. La position de l'éclair correspond à la naissance de l'impulsion, celle-ci n'atteignant son point culminant que légèrement plus tard (MacGorman et Rust, 1988). Même si les différents arcs d'un éclair localisés par référence aux pics de l'impulsion sont peu dispersés, les erreurs liées à la naissance de l'impulsion peuvent fausser la localisation du groupe tout entier.

Des erreurs plus importantes encore peuvent être provoquées par des effets de réfléchissement ionosphérique ou de distorsion de la forme d'onde en raison de la distance qui brouillent ou décalent l'apparition du pic de l'impulsion. À en croire l'un des fabricants, de telles localisations aberrantes sont généralement distinctes, réparties aléatoirement, et on peut en réduire le nombre par filtrage (élimination des cas où, durant un laps de temps convenablement choisi, un seul relevé est visible sur une portion de carte d'une dimension donnée).

D'après un rapport diffusé par le fabricant, l'efficacité d'un réseau TOA comprenant de quatre à six stations avoisinerait 80 à 85 pour cent pour la détection des arcs. Un coup de foudre pouvant être détecté même si l'un de ses arcs ne l'est pas (ceci vaut également pour les radiogoniomètres) l'efficacité serait certainement supérieure pour les éclairs. Aucune estimation n'est cependant fournie à ce sujet et on ne sait pas non plus avec quelle efficacité sont rejetées les impulsions provenant d'autres sources que les éclairs nuage-sol.

7.3.5 Maintenance d'un système TOA

Un réseau TOA ne diffère presque en rien d'un réseau radiogoniométrique sous les angles de l'exploitation et de la maintenance, c'est-à-dire que l'entretien du matériel ne pose guère de problèmes tandis que la diffusion des données et le contrôle scientifique de leur qualité constituent des tâches de longue haleine mais intéressantes.

7.3.6 Système ATD

L'Office météorologique du Royaume-Uni a mis en place son réseau de positionnement par calcul du décalage entre les instants d'arrivée (ATD) afin de prouver qu'il était possible de localiser ainsi les éclairs dans une vaste zone du continent européen et de la partie orientale de l'Atlantique. Il a choisi cette technique parce que c'était celle dont les résultats étaient les plus exacts à grande portée. Du fait que des effets de propagation modifient les formes d'onde des atmosphériques accomplissant un long parcours, le calcul des différences entre les instants d'arrivée à deux détecteurs s'effectue par une méthode de corrélation des écarts dans le temps s'appliquant à l'enveloppe toute entière de la forme d'onde.

7.3.7 Réseau ATD

Le réseau est formé de cinq détecteurs installés en Grande Bretagne à des intervalles allant de 300 à 900 km, auxquels s'en ajoutent deux autres à Gibraltar et à Chypre, soit à 1700 et 3300 km respectivement du Royaume-Uni, qui revêtent une importance cruciale pour le fonctionnement à longue portée du système. L'un des détecteurs (le «sélecteur») est rendu moins sensible que les autres, lesquels sont amenés à soumettre les données sur les atmosphériques qu'ils reçoivent dans une tolérance de temps donnée du sélecteur. On calcule alors les positions pour ceux des éléments qui satisfont à certains critères de qualité, par exemple aux conditions que quatre détecteurs au moins les aient transmis, que les corrélations soient suffisantes et que l'amplitude des atmosphériques varie convenablement avec la distance.

7.3.8

Exactitude des localisations et efficacité de la détection par ATD

L'exactitude des localisations atteint normalement de 1 à 2 km au Royaume-Uni, de 2 à 5 km en Europe, de 5 à 10 km dans la partie orientale de l'Atlantique. Elle se situe ensuite entre un et deux pour cent de là distance jusqu'à 12000 km . Sans les détecteurs implantés en dehors de la Grande Bretagne, elle diminue d'un facteur 10 hors du Royaume-Uni.

La vitesse de transmission des circuits de télécommunications et la puissance du processeur limitent à 450 éclairs par heure la capacité de traitement du système actuel. L'efficacité en détection est par conséquent assez faible et dépend du niveau général de l'activité orageuse dans la zone desservie; en Europe, elle va de 25 à 70 pour cent.

7.3;9

Maintenance d'un système ATD

Les oscillateurs de précision servant à conserver l'heure exacte dans les stations détectrices demandent à être étalonnés périodiquement au moyen des signaux chronométriques des systèmes LORAN-C ou GPS. L'exploitation d'un système à grande portée requiert l'emploi d'un modèle adéquat de la propagation pour corriger les effets diurnes ainsi que les modifications de la trajectoire lors des passages entre la terre et la mer. A défaut, on effectue régulièrement des tests de concordance chronométrique en utilisant les données de tous les détecteurs du réseau.

7.4

COMPARAISONS ENTRE LES RÉSEAUX RADIOGONIOMÉTRIQUES ET TOA

Le fait que des systèmes radiogoniométriques aient été disponibles sur le marché depuis la fin des années 70 et que les systèmes TOA soient apparus au moins cinq années plus tard se traduit par une forte disproportion entre les relations de l'expérience acquise dans leur exploitation. Assez abondants sur les performances de différentes installations de détection locale des éclairs, les renseignements sont rares sur celles des réseaux TOA et plus rares encore les comparaisons effectuées entre les deux systèmes. Il ne faut donc pas considérer les résultats présentés ici comme directement généralisables à tous les pays, indépendamment des conditions qui y prévalent, ni oublier que les deux systèmes se perfectionnent sans cesse. Toute institution désireuse de mettre en place un nouveau dispositif de localisation des éclairs doit par conséquent tenir compte du plus récent état de la situation et consulter le plus grand nombre possible de rapports.

Les résultats des comparaisons réalisées à ce jour sont malheureusement parus non dans des revues largement diffusées, mais dans des rapports internes qu'il est difficile de se procurer. Exposés oralement lors d'une conférence, ceux de la comparaison faite par MacGorman et Rust (1988) ne figurent pas intégralement dans les actes de la réunion. Le compte rendu d'une autre étude comparative accomplie par Oskarsson (1989) n'a été publié que dans un rapport interne rédigé en suédois.

Selon Murphy (1988), l'erreur moyenne de localisation est d'environ 3 km dans les principaux réseaux radiogoniométriques des États-Unis d'Amérique ; elle descend en-dessous d'1 km dans les zones où les lignes de base sont courtes, monte à 5 km lorsqu'elles sont longues. L'efficacité de la détection avoisine ordinairement 70 pour cent et le taux des fausses détections est extrêmement faible. L'auteur n'indique pas si l'on applique une procédure d'optimisation dans le calcul des positions. Pour les TOA, les erreurs de localisation sont de l'ordre de 10 km et l'efficacité de la détection comprise entre 35 et 45 pour cent. Il est toutefois probable que les progrès techniques accomplis depuis lors aient amélioré ces performances.

Oskarsson (1989) a comparé les performances respectives d'un système radiogoniométrique et d'un système TOA durant quelques orages en Suède. Les utilisateurs du TOA ont estimé à 5 km l'exactitude moyenne de ses positionnements et son fonctionnement a été jugé légèrement meilleur que celui du système radiogoniométrique, mais on n'utilisait manifestement pas de procédure d'optimisation dans ce dernier; or, Passi et Lopez (1989) ont donné un exemple frappant des conséquences que ceci entraînait. Le rapprochement entre le nombre des éclairs et des décharges a révélé que l'efficacité du TOA dans la détection des éclairs était d'une fois à une fois et demie inférieure à celle du système radiogoniométrique. En Finlande, l'exactitude moyenne des positionnements fournis par un réseau de quatre radiogoniomètres a été estimée à 5 km après apport de corrections systématiques et optimisation (Tuomi, 1991), l'exactitude en temps réel, sans optimisation, étant un peu plus médiocre.

Il est permis d'en conclure que les deux systèmes rivaux ont en gros des performances analogues. Au moment d'acheter l'un d'entre eux, ou n'importe quel autre à des fournisseurs concurrents, il serait bon d'essayer de répondre à des questions comme les suivantes en exploitant les plus récentes informations disponibles :

- le processeur central du système radiogoniométrique se prête-t-il à l'application d'une procédure d'optimisation ?

- pourra-t-on faire contrôler par une personne qualifiée la qualité des données fournies par chacun des deux systèmes ?
- quels sont les systèmes, s'il y en a, en service dans les pays voisins ? Serait-il utile de connecter les réseaux ?
- de bons signaux chronométriques sont-ils disponibles pour le TOA ?
- dans quelle mesure le TOA rejette-t-il les fausses alarmes ? Quelle est en conséquence son efficacité en détection ?
- qu'est-il important de détecter pour l'application visée, les éclairs ou leurs arcs ?
- de quels circuits de télécommunications aura-t-on besoin ? Relier le processeur central aux stations de mesure, radiogoniométriques ou TOA, sera sans doute coûteux dans les deux cas, à moins de pouvoir utiliser des installations existantes.
- combien de stations radiogoniométriques ou TOA seraient-elles nécessaires pour localiser les éclairs avec l'exactitude voulue et les détecter avec l'efficacité souhaitable dans la zone à couvrir ?
- le recensement des sites où peuvent être installées les stations fournit-il des arguments en faveur du système TOA ou radiogoniométrique ?

7.5 EMPLOI COMBINÉ DES DEUX TECHNIQUES

Le système de localisation SAFIR mis au point en France, perfectionné mais assez coûteux, détecte très efficacement les éclairs avec une bonne exactitude dans un rayon d'environ 150 km au moyen de capteurs VHF. Le réseau type comprend trois détecteurs installés à une distance comprise entre 20 et 70 km d'une station centrale et couvrant chacun un secteur de 120°. Chaque détecteur est muni de trois antennes, couvrant elles aussi chacune un secteur de 120°, disposées entre un et deux mètres d'un point central sur la monture. Celle-ci tient lieu d'interféromètre pour le calcul à la fois de l'azimut et de l'angle d'élévation des éclairs observés. Le taux d'acquisition des données est suffisamment élevé pour qu'on puisse identifier des sections de la trajectoire des éclairs et bien distinguer ainsi les arcs entre nuages des arcs nuage-sol. Le système convient parfaitement à l'annonce des risques de foudre sur les bases de lancement d'engins spatiaux, les aérodromes etc. où les éclairs intranuages présentent un danger particulier. Sa portée relativement courte en rend l'emploi moins intéressant dans un réseau de localisation d'échelle nationale.

7.6

**PRÉSENTATION
ET DIFFUSION
DES DONNÉES**

La souplesse des moyens informatiques actuels ouvre de nombreuses possibilités pour la présentation des données. L'un des procédés les plus utiles pour les prévisionnistes consiste à superposer sur un écran les points d'impact des éclairs à des images de

radar météorologique ou des images satellites afin de repérer les nuages actifs.

Les réseaux informatiques ouvrent également des possibilités presque illimitées pour la diffusion des données d'utilisation immédiate et différée sur la position des éclairs. Les problèmes à résoudre ne diffèrent pas de ceux que soulève la diffusion de n'importe quelle autre information.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Bent, R.B. and W.A Lyons, 1984 : Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (lightning position and tracking system) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique. *Preprints of the Seventh International Conference on Atmospheric Electricity*, Albany, New York, American Meteorological Society, pp. 317–324.
- Grandt, C. and H.Volland, 1988 : Locating thunderstorms in South Africa with VLF sferics : Comparison with METEOSAT infrared data. *Proceedings of the Eighth International Conference on Atmospheric Electricity*, Uppsala, Sweden, Institute of High Voltage Research, pp. 660–666.
- Heydt, G. and T. Takeuti, 1977 : Results of the global VLF-atmospherics analyser network. In H. Dolezalek and R. Reiter : *Electrical Processes in Atmospheres*, Steinkopf, Darmstadt, pp. 687–693.
- Holle, R.L., R.E. Lopez and A.I. Watson, 1990 : Cloud-to-ground lightning detection using direction-finder networks : *WMO Bulletin*, Volume 39, Number 3, pp. 177–180.
- Johnson, R.L., D.E. Janota and J.E. Hay, 1982 : An operational comparison of lightning warning systems. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 21, Issue 5, pp. 703–707.
- Krider, E.P., R.C. Noggle and M.A. Uman, 1976 : A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 15, pp. 301–306.
- Lee, A.C.L., 1986a : An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 112, Issue 471, pp. 203–229.
- Lee, A.C.L., 1986b : An operational system for the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, Volume 3, Issue 4, pp. 630–642.
- Lee, A.C.L., 1989 : Ground truth confirmation and theoretical limits of an experimental VLF arrival time difference lightning flash locating system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 115, Issue 489, pp. 1147–1166.
- MacGorman, D.R. and W.D. Rust, 1988 : An evaluation of the LLP and LPATS lightning ground strike mapping systems. *Proceedings of the Eighth International Conference on Atmospheric Electricity*, Uppsala, Sweden, Institute of High Voltage Research, pp. 668–673.
- Mach, D.M., D.R. MacGorman, W.D. Rust and R.T. Arnold, 1986 : Site errors and detection efficiency in a magnetic direction-finder network for locating lightning strikes to ground. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 3, Issue 1, pp. 67–74.
- Maier, M.W., L.G. Byerly, R.C. Binford, W.L. Hiscox, E.P. Krider, A.E. Piper and M.A. Uman, 1984 : Gated, wideband magnetic direction finders for locating cloud-to-ground lightning. *Preprints of the Seventh International Conference on Atmospheric Electricity*, Albany, New York, American Meteorological Society, pp. 305–310.
- Murphy, J.D., 1988 : *Lightning Detection System Acquisition and Application*. Fifth Weather Wing Forecaster Memorandum.
- Orville, R.E., Jr., 1987 : An analytical solution to obtain the optimum source location using multiple direction finders on a spherical surface. *Journal of Geophysical Research*, Volume 92, (D9), pp. 10877–10886.
- Orville, R.E., R.A. Weisman, R.B. Pyle, R.W. Henderson and R.E. Orville, Jr., 1987 : Cloud-to-ground lightning flash characteristics from June 1984 through May 1985. *Journal of Geophysical Research*, 92 (D5), pp. 5640–5644.
- Oskarsson, K., 1989 : *En jämförande studie mellan blixtpejlsystemen LLP och LPATS*. Meteorological Institute, Uppsala University, Sweden.
- Passi, R. M. and E.L. Lopez, 1989 : A parametric estimation of systematic errors in networks of magnetic direction finders. *Journal of Geophysical Research*, Volume 94 (D11), pp. 13319–13328.
- Tuomi, T.J., 1990 : On the accuracy and detection efficiency of a lightning location system of four direction finders. *Geophysica*, Volume 26, pp. 1–16.

CHAPITRE 8

OBSERVATIONS SATELLITAIRES¹

8.1 GÉNÉRALITÉS

Le présent chapitre décrit les techniques de télédétection par satellite employées pour la mesure et l'observation météorologiques et connexes à la surface de la Terre ainsi que dans la troposphère et la stratosphère. Il donne un aperçu des caractéristiques techniques des systèmes à satellites et des méthodes de réduction des données employées en les replaçant dans le contexte des systèmes de collecte de données basés en surface, objet principal du présent Guide, et en mettant en avant les différences et les avantages comparés des deux approches. Les sections 8.2 et 8.4 sont consacrées à la technologie des satellites. La section 8.3 décrit les méthodes utilisées pour calculer des grandeurs météorologiques à partir des luminances énergétiques qui sont mesurées directement par les instruments embarqués à bord des satellites, en donnant des explications sur leur exactitude, leur représentativité et la manière dont elles se rattachent aux données d'observation en surface.

Les systèmes à satellites ne cessent d'évoluer et de nouveaux systèmes en cours d'élaboration devraient devenir opérationnels d'ici quelques années. Dans l'ensemble, les techniques de base restent appropriées et l'on pourra continuer de se référer, pour les besoins présents, aux informations fournies dans ce chapitre pour faire des comparaisons avec les méthodes de surface. Les satellites météorologiques et les systèmes européens de traitement des données sont décrits ici en tant qu'exemples de techniques employées pour l'acquisition de données météorologiques, les techniques et méthodes de traitement utilisées par les autres systèmes à satellites n'étant guère différentes.

Pour plus de précisions sur la technologie des satellites et les mesures par satellite, on pourra consulter les références fournies en fin de chapitre. On trouvera aussi des descriptions générales très utiles dans les publications de Rao et al. (1990), de l'OMM (1994a) et de Smith (1985). Une publication de l'OMM (1994b) fournit des descriptions détaillées de satellites et d'instruments ainsi qu'un énoncé des besoins qui fait autorité. Des informations générales concernant les besoins de l'OMM figurent dans des publications de l'OMM (1989 ; 2003).

Les satellites météorologiques types sont en orbite autour de la Terre à des altitudes voisines de 36 000 ou de 850 km ; ils servent à obtenir des images et des informations quantitatives sur la surface terrestre et les 20 premiers kilomètres de l'atmosphère. Cela nécessite bien entendu des instruments très sensibles et des systèmes de traitement des données très poussés ainsi que des équipements onéreux, mais le volume et la qualité des données recueillies en valent la peine. On trouvera ci-après une analyse coût-éfficacité succincte des systèmes à satellites.

Le recours à des capteurs embarqués à bord de satellites pour mesurer des grandeurs géophysiques comporte des avantages et des inconvénients par rapport aux systèmes d'observation basés au sol. Ils sont résumés dans le tableau 8.1.

Le recours aux satellites météorologiques se justifie en partie par leur capacité de prise d'images. Les images de nuages sont en effet irremplaçables lorsqu'il s'agit d'analyser la situation météorologique. On peut même accroître leur utilité en utilisant des séquences d'images en accéléré qui nous aident à comprendre les processus atmosphériques. Ces informations relatives à la configuration des nuages ne sont pas quantitatives.

Les mesures météorologiques quantitatives constituent un solide argument en faveur de l'utilisation des satellites. Les modèles de prévision numérique nécessitent en effet que l'on mesure avec précision et à intervalles rapprochés les paramètres atmosphériques, et ce pour de nombreux niveaux et sur une grille serrée tout autour du globe. La résolution spatiale requise pour les observations dépend de la nature du modèle. Les exigences à remplir, en matière d'observation, pour les besoins de l'exploitation météorologique sont résumées dans le tableau 8.2.

Les informations requises à l'échelle mondiale et figurant dans le tableau 8.2 pourraient être fournies par un réseau adéquat d'environ 5 000 stations classiques réparties régulièrement, de préférence, tout autour du globe, chacune mesurant, deux à quatre fois par jour, la pression en surface ainsi que le vent, la température et l'humidité à de nombreux niveaux, entre la surface et 50 hPa. On ne saurait toutefois établir un tel réseau sur les zones océaniques et, de surcroît, son coût annuel serait de l'ordre de 10 billions de dollars E.-U.

¹ Le contenu technique de ce chapitre n'a pas été révisé depuis la précédente édition du Guide.

Tableau 8.1. Systèmes à satellites comparés aux systèmes d'observation au sol

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Couverture mondiale, y compris océans et zones continentales difficiles d'accès	Les paramètres atmosphériques, océanographiques et hydrologiques ne sont pas mesurés directement
Haute résolution spatio-temporelle sur de vastes zones	Faible exactitude pour des points donnés : l'étalonnage des instruments et les méthodes de réduction des données nécessitent une attention constante
Possibilité de mesurer un large éventail de paramètres	Longs délais de mise en service pour les nouveaux instruments
Rapport coût/avantage favorable pour un gros volume de données	Importante mise de fonds pour le lancement d'un satellite et les principaux équipements au sol
Mesure simultanée d'un grand nombre de paramètres	La défaillance d'un capteur peut entraîner la perte de la totalité des données
Poursuite des mesures même par mauvais temps	Les paramètres relatifs à la surface terrestre et aux basses couches de l'atmosphère ne peuvent être mesurés que partiellement lorsque les nuages sont épais (mauvais temps)
Mesures sur toute l'épaisseur de l'atmosphère dans certaines conditions	Les données à traiter et à archiver sont très nombreuses et il n'est pas facile pour les utilisateurs d'intervenir dans ce domaine

Tableau 8.2. Informations requises par les modèles pour les différentes échelles de prévision

	<i>Mondiale</i> Moyenne échéance	<i>Régionale</i> Courte échéance	<i>Locale : prévision immédiate</i> Très courte échéance
Échelle de prévision	2-14 jours	12-48 h	0-12 h
Zone concernée (rayon en km autour du point pour lequel la prévision est requise)	Ensemble du globe	3 000	1 000
Résolution horizontale du modèle (km)	150	75	15 (5 pour la prévision immédiate)
Fréquence des observations	12 h	6 h	1 h (15 min pour la prévision immédiate)
Délai de réception des produits	3 h	2 h	30 min (5 min pour la prévision immédiate)

Par comparaison, l'ensemble du globe peut être observé par un système de sept satellites météorologiques. Un programme mondial consistant à lancer chaque année, selon les besoins, un certain nombre de nouveaux satellites est nécessaire pour remplacer ceux qui sont parvenus en fin de vie ou faire office de satellites de réserve ; l'ensemble du système pourrait coûter annuellement moins de 500 millions de dollars E.-U, à l'exclusion des coûts d'étude et de mise au point.

Le même type d'argument peut être invoqué au sujet des réseaux d'observation plus denses requis pour la

prévision à l'échelle régionale et à l'échelle locale. Les données utilisées pour la prévision immédiate (0-2 heures) dans les grands centres d'exploitation doivent répondre à des conditions encore plus strictes que celles qui sont énoncées dans la troisième colonne du tableau 8.2. Elles doivent faire ressortir les changements rapides qui surviennent à petite échelle ; les exigences ci-après revêtent donc une grande importance :

- (a) transmission très rapide au prévisionniste ;
- (b) haute résolution temporelle (cinq minutes pour la convection, 15 pour les fronts) ;

- (c) haute résolution spatiale (1 km pour les phénomènes de convection et 3 km pour les fronts).

Pour satisfaire ces exigences en matière d'observation, il faudrait établir des réseaux supplémentaires, très denses, de type classique, alors que le même système mondial de satellites pourrait y répondre, pour un surcroît de coût relativement faible moyennant les ajustements voulus.

Chaque satellite est certes coûteux, mais l'ensemble fournit un plus grand nombre d'observations par dollar ; l'utilisation intensive des satellites météorologiques est donc surtout intéressante du point de vue financier ; ils permettent en effet d'acquérir dans de bonnes conditions d'économie et d'efficacité des données d'observation d'une résolution et d'une exactitude satisfaisantes.

Les grandeurs météorologiques actuellement mesurées dans le cadre de l'exploitation, leur résolution et leur exactitude variant selon les cas, sont les suivantes :

- (a) profil de la température et température au sommet des nuages ainsi qu'à la surface de la mer et des terres émergées ;
- (b) profil de l'humidité ;
- (c) vitesse et direction du vent au niveau des nuages et à la surface de l'océan ;
- (d) eau à l'état liquide et quantité totale d'eau contenue dans l'atmosphère ; intensité des précipitations ;
- (e) bilan radiatif et albédo ;
- (f) type de nuage et hauteur du sommet des nuages ;
- (g) ozone total ;
- (h) couverture de neige et de glace ainsi que limite d'extension.

Nombre de ces mesures sont décrites dans le présent chapitre, tout comme les techniques de mesure des grandeurs non météorologiques, végétation et cendres volcaniques, qui sont importantes du point de vue de l'exploitation.

De par leur nature, les mesures effectuées par satellite ont des résolutions spatiales (horizontale et verticale) beaucoup moins fines que les mesures de surface. La résolution et, dans la plupart des cas, l'exactitude de ces mesures ne conviennent pas pour toutes les applications, notamment la modélisation, et la meilleure solution consiste donc à les combiner avec des données d'observation recueillies par les réseaux de surface. Loin de se faire concurrence, les observations spatiales et les observations en surface doivent être considérées comme des sources de données complémentaires.

8.2 SYSTÈMES À SATELLITES OPÉRATIONNELS

8.2.1 Véhicules spatiaux

Lors de la conception d'un véhicule spatial, il faut tenir compte de l'absence de gravité sur une orbite libre, des conditions de vide très poussé dans lesquelles les matériaux ont des propriétés très différentes de celles qu'ils ont à la surface de la Terre, de la présence du rayonnement de particules énergétiques et de poussières de micrométéorites.

Le véhicule satellite (plate-forme) sert de structure sur laquelle on monte les instruments surveillant la Terre et son atmosphère, mais il doit aussi fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement des instruments, de la régulation thermique, du contrôle d'aspect, un système de traitement des données et des moyens de communication. L'énergie est normalement fournie par des cellules solaires qui, lorsque le satellite se trouve dans le secteur non éclairé de la Terre, sont secourues par des batteries de stockage d'énergie.

Les capteurs et les autres équipements électriques ne fonctionnent que dans des plages de température particulières. Donc la chaleur dégagée par l'équipement électronique, ou absorbée à partir du rayonnement incident, doit être équilibrée par l'émission du rayonnement de grandes longueurs d'onde dans l'espace. On peut activement contrôler la température en faisant varier le rayonnement net de grandes longueurs d'onde via le contrôle d'attitude, ou en actionnant des volets de fermeture pour augmenter ou diminuer la superficie des surfaces radiantes orientées vers l'espace froid. Le contrôle d'aspect d'un véhicule spatial est obtenu par différents moyens dépendant de la conception globale. On peut maintenir des vitesses de rotation précises en jouant sur la répartition de la masse du satellite et donc sur son couple d'inertie. On peut aussi utiliser des systèmes inertIELS qui produisent un moment de torsion par rapport au champ magnétique terrestre et on peut actionner des buses de réaction. Il est bon de noter que plus le véhicule est stable, plus sa durée de vie utile sera longue. Le frottement atmosphérique interdit la mise sur orbite à moins de 300 km d'altitude, car il réduit considérablement la durée de vie. Toutefois, aux altitudes plus élevées, ce frottement est très faible et l'on peut parvenir à des durées de vie de plusieurs années.

8.2.2 Dynamique orbitale d'un satellite

Un satellite se déplaçant, en l'absence de frottement, dans le champ de gravitation d'une planète sphérique (figure 8.1) a une trajectoire elliptique,

parabolique ou hyperbolique, selon sa vitesse d'injection (Massey, 1964). L'orbite d'un satellite tournant autour de la Terre doit être elliptique ou alors circulaire, ce qui est un cas particulier. Pour l'orbite elliptique représentée à la figure 8.1(a), la distance r entre le satellite et le centre de la Terre est obtenue par la formule :

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta} \quad (8.1)$$

où θ est l'angle entre le rayon vecteur actuel du satellite et le rayon vecteur au périgée (le point de l'orbite le plus rapproché de la Terre) ; a est le demi-grand axe de l'ellipse ; ae est la distance entre le centre de l'ellipse et le centre de la Terre ; e est l'excentricité de l'ellipse.

La période de temps T qu'il faut au satellite pour effectuer une orbite est :

$$T = 2\pi \left(\frac{a^3}{GM} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8.2)$$

où G est la constante gravitationnelle ; M est la masse de la Terre et $GM = 3,986\,03 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$. Pour une orbite circulaire centrée sur la Terre, $e = 0$, $a = r$ et la vitesse horizontale du satellite est :

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (8.3)$$

En fonction de la hauteur h au-dessus de la Terre (figure 8.1(b)) et de l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre, $g = GM/R^2$, où $R = 6\,378 \text{ km}$ est le rayon équatorial moyen de la Terre, on a :

$$v_0 = R \sqrt{\frac{g}{R + h}} \quad (8.4)$$

La fusée sur laquelle est fixé le véhicule spatial doit être lancée de façon à obtenir une trajectoire dont résultent la hauteur h voulue et sa vitesse V . Si, lorsque le satellite atteint la hauteur h , sa vitesse est $V < V_o$, il tombe sur une orbite elliptique pour laquelle

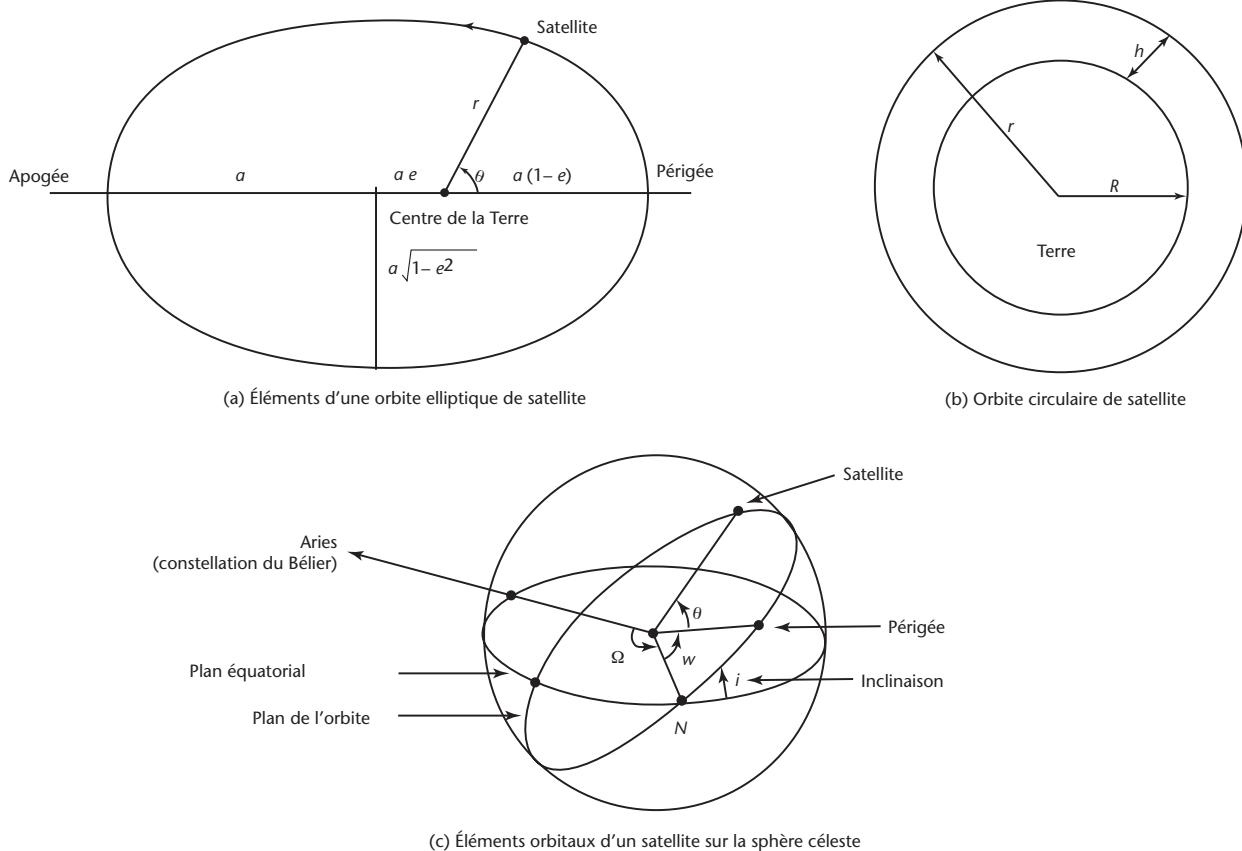


Figure 8.1. Géométrie des orbites de satellite

$a < (h+R)$. Cependant, si $V > V_o$, le satellite va se déplacer vers une ellipse plus élevée avec $a > (h+R)$. Si $V > 2V_o$, l'orbite devient alors parabolique, le satellite a atteint sa vitesse de libération et il n'orbitera plus autour de la Terre.

On obtient une orbite géostationnaire si le satellite orbite dans le même sens que la rotation de la Terre, avec une période d'une journée. Si l'orbite est circulaire au-dessus de l'équateur, le satellite devient stationnaire relativement à la Terre et voit donc toujours la même portion de la surface terrestre. En supposant $T = 1 \text{ jour} = 86\,400 \text{ secondes}$, alors l'équation 8.2 donne $a = 42\,290 \text{ km}$ et donc, pour une orbite géostationnaire $h = a - R = 35\,910 \text{ km}$.

Les orbites plus basses ont des périodes beaucoup plus courtes. Aux altitudes comprises entre 500 et 2 000 km, les satellites sont normalement placés sur des orbites polaires pratiquement circulaires telles qu'ils survolent les pôles avec une période approximative de une à deux heures. L'altitude habituelle des satellites météorologiques est de 880 km. A mesure que la Terre tourne sous cette orbite, le satellite explore effectivement du nord au sud d'un côté de la Terre et du sud au nord de l'autre côté, plusieurs fois par jour, couvrant ainsi une superficie beaucoup plus grande que s'il était sur une orbite non polaire.

Jusqu'à maintenant dans la discussion, nous avons supposé une symétrie sphérique et un frottement nul. En réalité ce n'est pas le cas. La dérive principale à partir d'une orbite purement elliptique est due aux forces de pesanteur non symétriques résultant de la forme irrégulière et de la répartition de la masse de la Terre. Les gravitations solaire et lunaire ne sont pas importantes, mais le bourrelet équatorial de la Terre a une grande importance, car il provoque une légère variation de la période du satellite qui se traduit par la variation temporelle de la position du périgée d'une orbite elliptique. Cette précession entraîne la rotation du plan orbital (figure 8.1(c)). Pour une hauteur d'orbite donnée, il est possible de choisir l'inclinaison i de façon à obtenir un pivotement du plan orbital de $0,986^\circ$ par jour, ce qui équivaut à une rotation complète du plan orbital par an ; en fait $i > 90^\circ$. Donc, l'orbite peut être fixe par rapport au Soleil, alors que la Terre orbite une fois par an autour de lui ; cela s'appelle une orbite héliosynchrone. Le satellite franchit l'équateur à la même heure solaire locale lors de chaque passage pendant toute l'année. La plupart des satellites à orbite polaire se trouvent sur des orbites héliosynchrones. Dans la pratique, l'inclinaison d'une orbite géostationnaire va varier aussi et, en termes plus généraux, il faudrait réellement utiliser une orbite géosynchrone. Le satellite paraîtra se déplacer dans

le ciel, chaque jour, selon une trajectoire en forme de «8» étroit. King-Hele (1964) traite en détail de la dynamique de l'orbite.

La hauteur orbitale du satellite détermine le rayon du cercle de visibilité pour la réception directe des données transmises en temps réel par le satellite ainsi que la largeur de la bande que le capteur du satellite peut observer. On améliore les deux en augmentant la hauteur du satellite. Cependant, alors qu'une hauteur orbitale plus élevée a ses avantages, cela présente des difficultés d'ordre pratique. Les satellites en orbite à plus de 1 100 km sont soumis à un flux nettement accru de particules chargées (qui peuvent altérer le rendement des cellules solaires et le comportement d'autres matériaux).

L'augmentation de la hauteur du satellite exige aussi des instruments plus sensibles pour conserver les mêmes résolutions au sol.

8.2.3 Capteurs à bord de satellites

Cette section décrit les capteurs embarqués à bord des satellites des Etats-Unis d'Amérique en tant que largement représentatifs de tels systèmes et les plus couramment utilisés.

Les renseignements concernant les nouveaux capteurs à bord de satellites et leurs possibilités ainsi que le rendement des capteurs plus anciens, sont contenus dans les comptes rendus annuels de l'OMM (WMO, 1994b).

Les capteurs embarqués à bord de satellites pour observer l'atmosphère se servent du rayonnement électromagnétique (REM) soit passivement, c'est-à-dire en détectant le REM provenant de la surface terrestre ou de l'atmosphère, soit activement, c'est-à-dire en se servant du REM émis par le capteur pour sonder l'atmosphère et mesurer les caractéristiques de la surface. La figure 8.2 montre le spectre électromagnétique et les parties qui sont couramment utilisées par les capteurs de télédétection embarqués. Pour observer les caractéristiques du sol et de la mer en se servant du rayonnement solaire, on doit utiliser des longueurs d'onde comprises entre 100 nm et 1 µm. Toutefois, les émissions de rayonnement de la mer sont détectées dans la gamme de 3 à 40 µm et dans les bandes hyperfréquences. On ne peut pas utiliser toutes les parties de ces gammes, car l'atmosphère ne transmet pas le REM à toutes les longueurs d'onde, comme le montre la figure 8.3. Cela sera traité plus avant à la section 8.3.

Les capteurs embarqués à bord de satellites peuvent être passifs ou actifs. Les systèmes opérationnels sont pour la plupart passifs, ils reçoivent le REM diffusé,

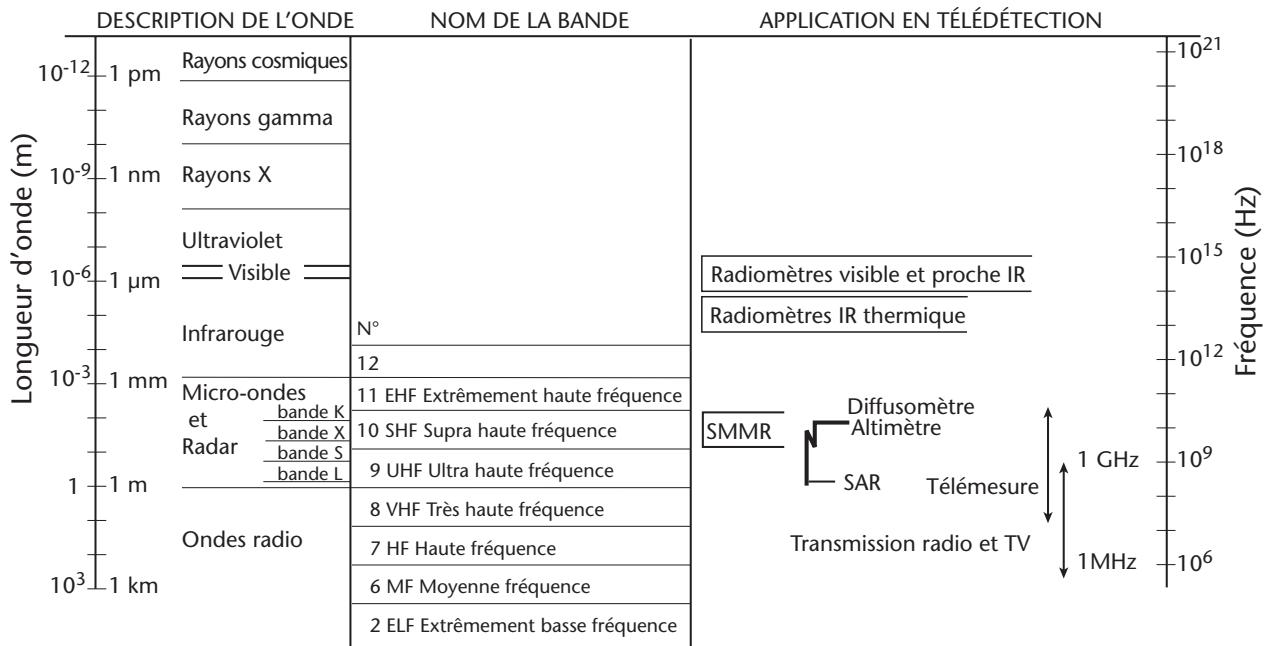


Figure 8.2.
Le spectre électromagnétique avec quelques définitions de bande et des applications typiques de télédétection

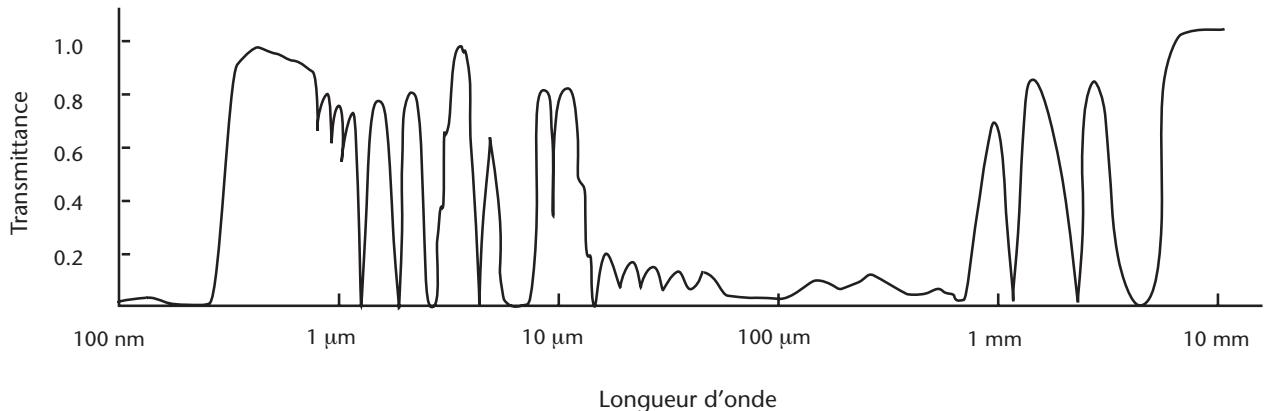


Figure 8.3.
Transmittance approximative des ondes électromagnétiques à travers l'atmosphère

réfléchi ou émis par l'atmosphère ou par la surface terrestre. Les systèmes actifs transmettent le REM, en hyperfréquences habituellement, et le détectent après qu'il ait été diffusé ou renvoyé au satellite.

On peut aussi répartir les capteurs entre ceux qui balaiient et ceux qui ne le font pas. L'angle solide interceptant la surface et l'atmosphère, duquel le capteur reçoit un signal à n'importe quel instant, s'appelle le champ de vision instantané (IFOV) ou, sur la surface terrestre, l'empreinte. La délimitation de l'IFOV n'est pas une démarcation précise entre le

zéro et la réponse totale, mais elle se situe réellement à une valeur de réponse seuil arbitraire. Le champ de vision peut couvrir une zone plus importante en provoquant le balayage du capteur embarqué. Si le véhicule spatial est du type stabilisé par rotation, on peut se servir de cette dernière pour obtenir le balayage du capteur. Il existe divers systèmes de balayage mécaniques et électroniques.

De nombreux télescopes utilisés dans les capteurs embarqués font appel à des miroirs pour former des images primaires. Par rapport à une lentille, un mi-

roir a l'avantage d'être totalement exempt d'aberration chromatique, mais il doit être parabolique pour éviter l'aberration sphérique.

La nature des capteurs utilisés de nos jours à bord des satellites météorologiques opérationnels peut être représentée par les brèves descriptions ci-après des imageurs et des sondeurs actuellement embarqués sur les satellites à orbite polaire de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA) et les satellites géostationnaires d'exploitation pour l'étude de l'environnement (GOES).

8.2.3.1 Satellites à orbite polaire

• Imageur

De tous les capteurs embarqués à bord de satellites, le radiomètre perfectionné à très haute résolution (AVHRR) est peut-être le plus connu et le plus largement utilisé aujourd'hui ; il vole depuis 1978, sous sa forme présente, à bord des satellites des séries TIROS-N/NOAA-A. En exploitation, le déplacement du satellite hôte fournit un axe pour une image balayée comparable à une image de télévision. A l'intérieur du capteur, un miroir orientable fournit le second axe de balayage. Des systèmes optiques dirigent une image vers des détecteurs qui enregistrent les valeurs de brillance observées au sein de ce que voit l'instrument dans différentes bandes spectrales.

Sous sa forme actuelle, l'AVHRR comporte cinq canaux spectraux sélectionnés par des filtres montés sur un disque tournant. Un canal observe dans la bande visible (0,58-0,68 µm), un dans le proche infrarouge (0,72-1,0 µm), et trois dans l'infrarouge thermique (3,55-3,93 µm ; 10,3-11,3 µm ; et 11,5-12,5 µm).

Des images à pleine résolution, avec un champ de vision au nadir d'environ 1,1 km, sont diffusées mondialement vers les utilisateurs locaux. Des données à haute résolution choisies et des données à résolution de moindre qualité (4 km) sont stockées à bord du satellite pour livraison aux stations terrestres, une par orbite généralement. Des images à faible résolution sont également diffusées, sous forme de fac-similé météorologique, qui permet de les recevoir avec des récepteurs peu coûteux et des antennes omnidirectionnelles.

• **Sondeur**

Les sondages provenant des orbiteurs polaires sont calculés à partir des données d'un ensemble de trois instruments, appelés collectivement sondeur vertical opérationnel de TIROS (TOVS).

Cela regroupe le sondeur en infrarouge à grand pouvoir séparateur (HIRS) à 20 canaux, un sondeur à hyperfréquences (MSU) à quatre canaux, et un sondeur stratosphérique (SSU) infrarouge à trois canaux. Le tableau 8.3 donne les caractéristiques des quatre instruments TOVS embarquées à bord des satellites à orbite polaire de la série NOAA, soit : le nombre de canaux ; le champ de vision au nadir ; le diaphragme ; l'angle de prise de vue balayé ; la largeur de fauchée ; le nombre de pixels vus par pas de fauchée ; et le niveau de numérisation des données. Ce tableau comprend aussi les données équivalentes de l'AVHRR, aux fins de comparaison.

Les Annexes 8.A et 8.B contiennent des détails sur les canaux AVHRR et HIRS et sur leurs applications. Il y a d'autres instruments à bord des orbiteurs polaires NOAA, y compris le détecteur de rayonnements solaires rétrodiffusés (SBUV) et le radiomètre dédié à l'expérience sur le bilan radiatif de la Terre (ERBE).

Aux latitudes moyennes, un orbiteur polaire passe dans le ciel deux fois par jour. Le choix de l'heure de la journée à laquelle le passage se produit à chaque longitude fait intervenir l'optimisation du fonctionnement des instruments et la réduction des temps nécessaires entre les observations et la livraison des données pour les modèles numériques de prévision.

L'adjonction d'un sondeur à hyperfréquence à 20 canaux, le sondeur amélioré à hyperfréquence, qui commencera avec NOAA-K, augmentera grandement le flot de données en provenance du vaisseau spatial. Ceci provoquera des changements dans les services de diffusion en direct. Deux autres capteurs, le MSU et le SSU, soit un total de sept canaux, seront alors supprimés.

Tableau 8.3. Systèmes d'instruments à bord des satellites NOAA

Instrument	Nombre de canaux	Champ de vision (km)	Ouverture (cm)	Angle de balayage (°)	Largeur de fauchée (km)	Pas	Données (bits)
SSU	3	147	8	± 40	± 736	8	12
MSU	4	105	—	± 47,4	± 1 174	11	12
HIRS	20	17	15	± 49,5	± 1 120	56	13

8.2.3.2 Satellites géostationnaires

• *Imageur*

Le radiomètre utilisé à bord des satellites des Etats-Unis d'Amérique jusqu'à GOES-7 (qui ont tous été stabilisés par rotation) porte un nom qui reflète sa lignée : le radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge (VISSR) qui se rapporte à ses canaux imageurs. Comme le sondeur atmosphérique du VISSR (VAS), il comporte maintenant 12 canaux dans l'infrarouge. Huit champs de visée parallèles dans le visible (0,55-0,75 µm) observent la partie ensoleillée de la Terre, avec une résolution de 1 km.

• *Sondeur*

Douze canaux dans l'infrarouge observent le rayonnement terrestre ascendant dans les bandes allant de 3,945 à 14,74 µm. Deux sont des fenêtres qui observent la surface, sept observent le rayonnement dans les bandes atmosphériques d'absorption du dioxyde de carbone, alors que les trois qui restent observent le rayonnement dans les bandes de la vapeur d'eau. Le choix des canaux a pour effet d'observer le rayonnement atmosphérique à différents niveaux de l'atmosphère. Grâce à un processus d'inversion mathématique, on peut estimer les températures en fonction de la hauteur dans la basse atmosphère et la stratosphère. L'estimation de la vapeur d'eau atmosphérique, dans plusieurs couches profondes, est une autre information de sortie.

Le tableau 8.4 donne les caractéristiques de l'instrument VAS/VISSR. Il donne les détails des balayages effectués par les satellites GOES, y compris : les champs de vision au nadir pour les canaux dans le visible et l'infrarouge ; les angles de vision balayés (à partir du vaisseau spatial) ; la largeur de fauchée à la surface de la Terre ; le nombre d'éléments d'image (pixels) par fauchée ; et le niveau de numérisation pour chaque pixel.

• *Capteurs auxiliaires*

Deux autres systèmes de collecte des données sont opérationnels à bord des satellites GOES. Trois capteurs se combinent pour former l'appareil d'étude du milieu spatial (SEM). Ces derniers communiquent les niveaux d'émission de rayons X solaires et surveillent la force du champ magnétique et les fréquences d'arrivée de particules à haute énergie. Un système de collecte des données reçoit les rapports transmis par radio par les plates-formes terrestres de collecte des données et, par transpondeur, les achemine vers une centrale de traitement. Les exploitants de plate-forme peuvent aussi recevoir leurs données par diffusion directe.

• *Nouveaux systèmes*

GOES 8, lancé en 1994, comporte trois axes de stabilisation et n'utilise plus le système VAS/VISSR. Il possède un imageur et un sondeur semblables, en de nombreux points, à l'AVHRR et au TOVS, respectivement, mais avec une résolution horizontale plus élevée.

8.2.4 Séries actuelles de satellites météorologiques et connexes

Pour des détails sur les satellites opérationnels et expérimentaux, se reporter au document WMO (1994b). Pour plus de commodité, en voici une brève description.

Le système mondial de satellites d'observation de la Veille météorologique mondiale est résumé à la figure 8.4. Il existe de nombreux autres satellites de télécommunications, d'étude de l'environnement ou à des fins militaires, dont certains ont aussi des applications météorologiques.

Satellites à orbite basse :

- (a) série TIROS-N/NOAA-A : satellites civils des États-Unis d'Amérique. Le système comprend au moins deux satellites dont le plus récent, NOAA-12, a été lancé en 1991. Ils fournissent des services d'imagerie et transportent des instruments de sondage de la température ainsi que de collecte de données et de localisation de plates-formes. Quelques-uns des produits de ces systèmes sont disponibles sur le Système mondial de télécommunications (SMT) ;
- (b) série DMSP : satellites militaires des États-Unis d'Amérique. Ils envoient des données image et

Tableau 8.4. Systèmes d'instruments dans le visible et l'infrarouge sur les satellites géostationnaires à balayage rotatif de la NOAA

Canal	Champ de vision (km)	Angle de balayage (°)	Largeur de fauchée (km)	Pixels/Fauchée	Numérisation (bits)
Visible	1	± 8,70	9 050	8 x 15 228	6
Infrarouge	7 - 14	± 3,45	2 226	3 822	10

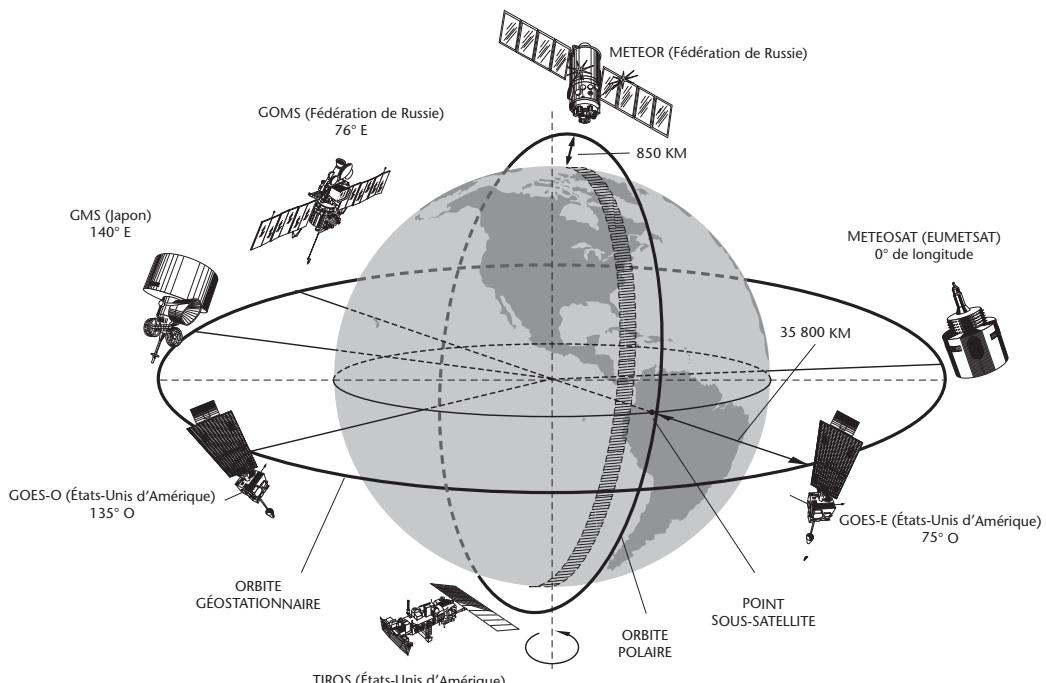


Figure 8.4. Le système de satellites d'observation de la veille météorologique mondiale

- de sondage à hyperfréquences tandis que l'instrument SSM/I fournit de l'imagerie à hyperfréquences. Leurs transmissions en temps réel sont cryptées, mais elles peuvent être disponibles à des fins civiles ;
- (c) série METEOR-2 : satellites russes. Ils fournissent des services d'imagerie et de sondage, mais de l'imagerie infrarouge de qualité médiocre. Les quelques données disponibles sur le SMT comprennent des images de la couverture nuageuse aux latitudes antarctiques ;
- (d) série FY-1 : satellites chinois. Ils fournissent des services d'imagerie, avec canaux dans le visible et l'infrarouge ;
- (e) SPOT : satellite français fournissant des services commerciaux d'imagerie à haute résolution ;
- (f) ERS-1 : satellite expérimental de l'Agence spatiale européenne lancé en 1991. Il fournit les températures de la mer en surface, de l'information sur les vents de surface et les vagues, ainsi que d'autres données océanographiques et environnementales.

Satellites géostationnaires :

- (a) GOES : satellites des Etats-Unis d'Amérique. Les produits actuels de la série GOES comprennent des données d'imagerie, de sondage et de déplacement des nuages. Lorsque deux satellites sont disponibles, ils sont généralement positionnés aux longitudes 75° et 135° O ;

- (b) GMS : satellites japonais. Ils fournissent une gamme de services semblables à ceux de GOES, mais sans sondage. Ils sont positionnés à la longitude 140° E ;
- (c) Météosat : satellites européens construits par l'Agence spatiale européenne. Ils offrent une gamme de services comparables à ceux de GOES. Ils sont positionnés à la longitude 0° ;
- (d) INSAT : satellite indien avec stabilisation sur les trois axes, lancé en 1989, et positionné à la longitude 74° E. Il fournit de l'imagerie, mais seuls les vents mesurés par nuage traceur sont disponibles sur le SMT.

Il n'y a donc effectivement que quatre satellites géosynchrones opérationnels actuellement.

8.3

OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES

8.3.1

Extraction de quantités géophysiques des mesures de luminance énergétique

La luminance énergétique est la grandeur que mesurent les capteurs des satellites, dans un certain nombre de bandes spectrales définies. Les données sont transmises aux stations au sol et peuvent être utilisées pour compiler des images ou, quantitativement, pour calculer

des températures, des concentrations de vapeur d'eau et d'autres gaz à effet radiatif direct, ainsi que d'autres propriétés de la surface terrestre et de l'atmosphère. Ces mesures peuvent se faire à de nombreux niveaux et l'on peut en tirer des profils à travers l'atmosphère.

Conceptuellement, les images sont des distributions continues bidimensionnelles de la brillance. C'est cette continuité que le cerveau semble si habile à traiter. Dans la pratique, les images provenant des satellites sont des assemblages d'éléments d'image (pixels) étroitement espacés, chacun ayant une brillance particulière. Lorsqu'on les regarde d'une distance appropriée, on ne peut les différencier des fonctions continues. L'œil et le cerveau exploitent les contrastes relatifs à l'intérieur d'une scène, à différentes fréquences spatiales, pour identifier les positions et les types de nombreux phénomènes météorologiques.

Les données de sondage sont utilisées habituellement dans des modèles numériques et elles sont donc, comme la plupart des autres données quantitatives provenant de la matrice de pixels, souvent traitées en tant que valeurs par point.

Les données de luminance énergétique provenant des canaux dans le visible peuvent être converties en réflectance de la surface observée. Les données des canaux dans l'infrarouge peuvent être converties en température, en se servant du concept de la température de luminance (voir section 8.3.1.1).

Il y a des limites quant à la quantité et à la qualité de l'information que l'on peut extraire d'un champ de luminances mesurées à partir d'un satellite. Il est utile d'examiner un système de télédétection arché-type passif pour voir où se situent ces limites. On suppose que la surface et l'atmosphère toutes deux réfléchissent, émettent, ou bien les deux, le rayonnement électromagnétique vers le système. On peut résumer ainsi le processus physique :

Les variations du rayonnement réfléchi sont causées par :

- (a) l'élévation du soleil ;
- (b) l'angle d'azimut satellite-soleil ;
- (c) l'angle de prise de vue du satellite ;
- (d) la transparence de l'objet ;
- (e) la réflectivité de la surface sous-jacente ;
- (f) la proportion dans laquelle l'objet remplit l'angle de prise de vue ;
- (g) les couches minces sus-jacentes (nuages minces ou aérosols).

De nombreux nuages sont loin d'être parallèles plans et horizontalement homogènes. Nous savons aussi, d'après l'interprétation des images par satellite habituelles, que les autres facteurs importants sont :

- (a) l'ombragement dû aux objets plus élevés ;
- (b) la forme de l'objet (topographie du nuage) produisant nuances et ombres dans la lumière réfléchie.

Les variations du rayonnement émis sont principalement causées par :

- (a) l'angle de prise de vue du satellite ;
- (b) les variations de la température du nuage ;
- (c) les variations de la température de la surface (sous le nuage) ;
- (d) le profil de température de l'atmosphère ;
- (e) les variations d'émissivité du nuage ;
- (f) les variations d'émissivité de la surface ;
- (g) les variations au sein du champ de vision de l'instrument du satellite ;
- (h) la composition de l'atmosphère entre l'objet et le satellite (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, ozone, nuages minces, aérosols, etc.).

Le système se compose essentiellement d'instruments optiques qui captent le rayonnement, d'un détecteur qui en détermine la quantité, de quelques équipements de télécommunications qui numérisent cette quantité (conversion en comptes) et la transmettent au sol ; plus d'autres équipements qui reçoivent l'information et la décident en quelque chose d'utilisable et enfin un dispositif qui la visualise. A chaque stade l'information potentiellement utile, concernant une scène en cours de vision, est perdue. C'est la conséquence d'une série de processus de numérisation qui transforment la scène continue. Cela comprend les résolutions dans l'espace, la longueur d'onde et le produit radiométrique, traités dans la section 8.3.1.2.

8.3.1.1 Température de luminance

• Émission d'un corps noir

Un «corps noir» absorbe complètement tout le rayonnement qu'il reçoit. En général, un corps n'absorbe qu'une fraction du rayonnement incident ; cette fraction est appelée l'absorptivité et elle dépend de la longueur d'onde. Dans le même ordre d'idées, l'efficacité de l'émission est appelée l'émissivité. Pour une longueur d'onde donnée :

$$\text{émissivité} = \text{absorptivité} \quad (8.5)$$

C'est la loi de Kirchhoff.

La luminance énergétique (puissance par unité de surface et par stéradian) par unité d'intervalle de longueur d'onde émise par un corps noir à la température T et à la longueur d'onde λ est donnée par la formule :

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp(hc/k\lambda T) - 1} \quad (8.6)$$

où B_λ ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}^{-1}$) et son équivalent en unités de nombre d'onde B_ν ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}$) sont connus sous le nom de fonction de Planck. c , h et k sont respectivement la vitesse de la lumière, la constante de Planck et la constante de Boltzmann. Les lois qui suivent peuvent être dérivées de l'équation 8.6.

B_λ culmine à la longueur d'onde λ_m donnée par :

$$\lambda_m T = 0,29 \text{ cm K} \quad (8.7)$$

C'est la loi de Wien. Pour le soleil, T est de 6000 K et λ_m de 0,48 μm. Pour la Terre, T est de 290 K et λ_m de 10 μm.

Le flux total émis par un corps noir est :

$$E = \int B_\lambda d\lambda = \sigma T^4 \quad (8.8)$$

où σ est la constante de Stefan. B est proportionnel à T aux longueurs d'onde hyperfréquences et infrarouge lointain (la partie Rayleigh-Jeans du spectre). La figure 8.5 montre la dépendance type de B par rapport à T pour λ égal ou inférieur à λ_m .

Si on mesure la luminance énergétique dans une bande étroite de longueur d'onde, on peut utiliser la fonction de Planck pour calculer la température du corps noir qui l'a émise :

$$T_\lambda = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[\frac{c_1}{\lambda^5 B_\lambda} + 1 \right]} \quad (8.9)$$

où c_1 et c_2 sont des constantes dérivées. Cela s'appelle la température de luminance et, pour la plupart des besoins, les luminances énergétiques transmises par le satellite sont converties en ces grandeurs T_λ .

• Absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique dans l'infrarouge est dominée par les bandes d'absorption de l'eau, du dioxyde de carbone, de l'ozone, etc. L'examen du rayonnement au sein de ces bandes permet de déterminer les caractéristiques de l'atmosphère : sa température et la concentration des absorbeurs. Toutefois, il y a des régions du spectre où l'absorption est faible, ce qui permet à un capteur de satellite de voir la surface ou le sommet du nuage et de déterminer sa température ou d'autres caractéristiques. De telles régions spectrales s'appellent des «fenêtres atmosphériques». Il existe une fenêtre particulièrement importante près du sommet de la courbe d'émission Terre/atmosphère, aux alentours de 11 μm (voir figure 8.3).

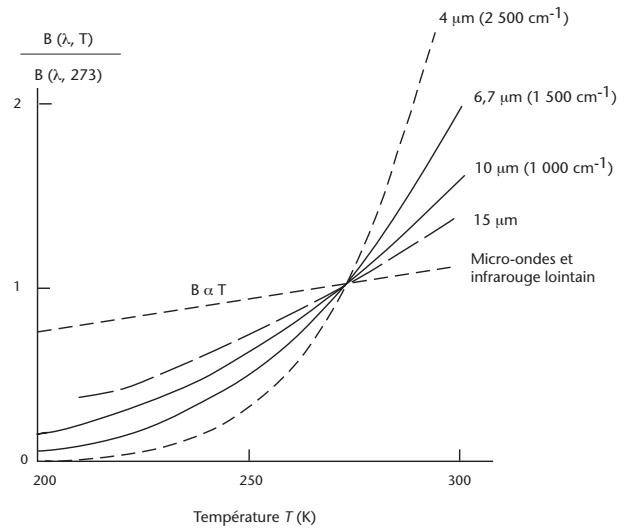


Figure 8.5.
Influence de la température sur la fonction de Planck

8.3.1.2 Résolution

• Résolution spatiale

La nature continue de la scène est divisée en un nombre d'éléments d'image discrets ou pixels qui sont fonction de la taille de l'optique, du temps d'intégration des détecteurs et, éventuellement, de l'échantillonnage subséquent. La taille de l'objet qui peut être résolue dans l'image affichée dépend de la taille de ces pixels.

A cause des effets de diffraction dus aux éléments du système optique, l'image focalisée d'un objet ponctuel éloigné dans la scène a une distribution angulaire caractéristique connue sous le nom de fonction d'étalement du point ou tache d'Airy (figure 8.6(a)). Deux objets ponctuels éloignés qui sont déplacés à l'intérieur du champ de vision sont considérés comme séparables (c'est-à-dire le critère de Rayleigh) si l'angle entre les maxima de leurs fonctions d'étalement du point est supérieur à λ/D , lorsque λ est la longueur d'onde du rayonnement et D le diamètre du faisceau (figure 8.6(b)).

Toutefois, si ces deux fonctions d'étalement du point sont suffisamment proches pour être focalisées sur le même détecteur, elles ne peuvent être résolues. Dans bien des systèmes de télédétection, c'est le déplacement effectif de détecteurs adjacents qui limite la résolution spatiale. Ce n'est que s'ils sont proches, comme dans la figure 8.6(c), que les deux objets peuvent être résolus. Une méthode générale de détermination de la résolution du système optique consiste à calculer ou à mesurer sa fonction de transfert de modulation. La modulation d'une fonction sinusoïdale est le rapport de la moitié de sa

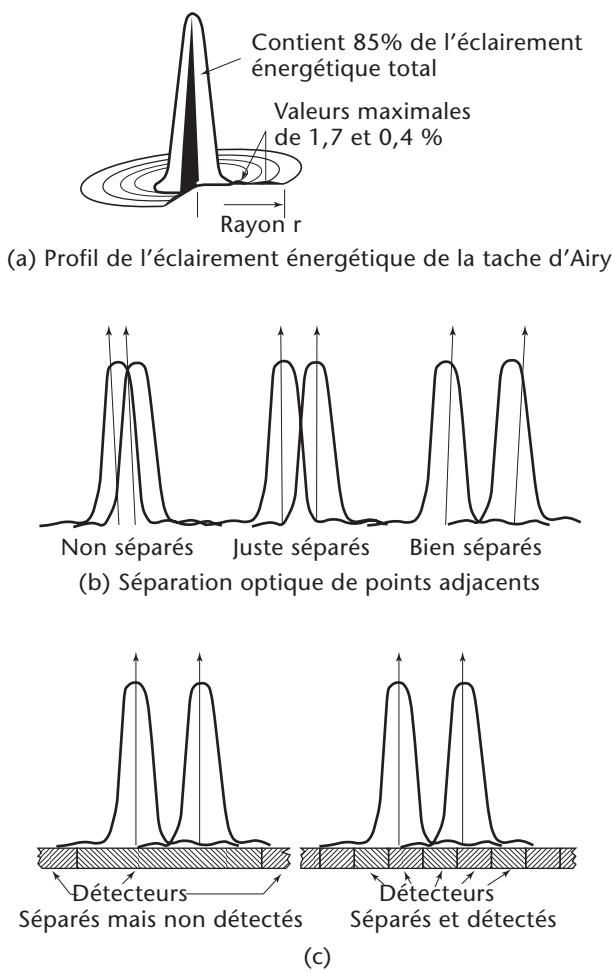


Figure 8.6. Résolution optique

valeur de crête à crête et de sa valeur moyenne. La fonction de transfert de modulation est dérivée de l'évaluation du rapport des modulations de sortie et d'entrée, en fonction de la longueur d'onde (ou de la fréquence spatiale) de la sinusoïde.

Dans la pratique, de nombreux systèmes embarqués se servent du déplacement du satellite pour développer l'image le long de sa trajectoire et de miroirs mobiles pour constituer l'image perpendiculairement à la trajectoire. Dans de tels systèmes, l'image focalisée des objets vus est balayée à travers un détecteur. L'information de sortie du détecteur est intégrée sur de courtes périodes de temps pour arriver à séparer les objets. La valeur obtenue pour chaque intégration est une convolution compliquée des fonctions d'étalement du point de chaque objet au sein de la scène avec la réponse spatiale du détecteur et le moment de chaque intégration.

Une alternative au balayage par des miroirs mobiles consiste à utiliser des détecteurs assemblés en ligne. Comme ils n'ont aucune partie mobile, ils sont

plus fiables que les miroirs ; cependant, ils créent des problèmes dans l'interétalonnage des différents détecteurs.

• Résolution radiométrique

La scène instantanée est focalisée par les optiques sur un détecteur qui réagit à l'éclairement énergétique qui l'atteint. La réaction peut se faire soit par effet direct sur les niveaux d'énergie électronique au sein du détecteur (détecteur quantique), soit à travers le rayonnement absorbé, en réchauffant le détecteur et en changeant quelques-unes de ses caractéristiques, comme sa résistance (détecteur thermique). Des tensions dues à un certain nombre de sources extérieures sont également détectées, y compris celles provoquées par :

- l'agitation thermique des électrons au sein du détecteur (bruit de Johnson) ;
- les irrégularités de surface et les contacts électriques ;
- la nature quantique des courants électriques (bruit de grenaille).

Pour augmenter le rapport signal/bruit, on peut équiper le système de gros appareils optiques de collecte, de détecteurs réfrigérés et de longs temps d'intégration de détecteur. La combinaison des tensions de signal et de bruit (un signal analogique) est intégrée en temps pour produire une valeur numérique. La séquence des valeurs intégrées correspondant à chaque ligne de la scène est ensuite codée et transmise au sol. Une fois les données reçues, décodées et transformées en produits utilisables, les images peuvent être affichées sur un visuel approprié. Habituellement, cela fait intervenir la valeur de chaque pixel en tant que couleur appropriée sur un écran ou en nuances de gris sur un enregistreur fac-similé.

• Résolution de l'affichage

Donc, la scène observée de façon continue a été transformée en pixels discrets sur un écran. La nature discrète de l'image n'est perceptible que lorsque les résolutions de l'image et du visuel ne concordent que grossièrement. Les pixels d'un écran type sont séparés d'environ 0,3 mm. Chaque pixel lui-même comprend trois points phosphorescents de couleur différente. À une distance de vue raisonnable de 75 cm, l'œil ne peut percevoir les pixels que s'ils sont fortement contrastés. Notons que la résolution de l'œil, 0,2 mrad environ, est limitée par la séparation des cellules photosensibles de la rétine.

La dernière partie du système fait intervenir les compétences d'interprétation du prévisionniste, qui utilise les images pour obtenir de l'information sur les systèmes météorologiques.

8.3.1.3 Étalonnage

• Étalonnage des canaux dans le visible

Les deux canaux dans le visible de l'instrument AVHRR sont étalonnés avant le lancement. Les luminances énergétiques mesurées par les deux canaux sont calculées à partir de :

$$L_i = A_i S_i \quad (8.10)$$

et

$$A_i = G_i X_i + I_i \quad (8.11)$$

où i est le numéro de canal ; L est la luminance énergétique ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$) ; X est le compte numérique (10 bits) ; G est le gain à l'étalonnage (pente) ; I est l'intercepte d'étalonnage ; A est l'albédo équivalent ; S est l'équivalent du rayonnement solaire calculé à partir de la constante solaire et de la réponse spectrale de chaque canal.

G et I sont mesurés avant le lancement. L'albédo équivalent, A , est le pourcentage de rayonnement solaire reçu de la partie supérieure de l'atmosphère (le Soleil étant au zénith) qui est réfléchi et mesuré par le radiomètre du satellite dans l'intervalle spectral valable pour chaque canal. L'absorption atmosphérique et les effets de diffusion sont négligés. Le terme albédo équivalent est utilisé ici pour indiquer que ce n'est pas une valeur d'albédo strictement vraie du fait que les mesures sont effectuées dans un intervalle spectral limité et que les valeurs ne sont pas corrigées des effets atmosphériques.

Pour calculer la réflectance de chaque pixel (considérant qu'il dépend de l'angle zénithal variable du Soleil, de l'angle zénithal variable du satellite et de l'angle d'azimut variable Soleil-satellite), le concept de réflectance bidirectionnelle peut être appliqué :

$$R_i(\mu_0, \mu, \phi) = A_i / \mu_0 \quad (8.12)$$

où R est la réflectance bidirectionnelle ; μ_0 est le cosinus de l'angle zénithal du Soleil ; μ est le cosinus de l'angle zénithal du satellite ; ϕ est l'angle d'azimut Soleil-satellite.

Un inconvénient d'un algorithme d'étalonnage déterminé au pré-lancement est que les conditions sur l'orbite du satellite pourraient différer considérablement de celles au sol, ce qui conduirait à des valeurs d'albédo incorrectes. Les effets de la dégradation du radiomètre avec le temps peuvent aussi affecter sérieusement l'étalonnage. Ces deux effets ont été observés sur les premiers satellites. Aussi, l'utilisateur doit prêter attention aux changements dans les techniques et les coefficients d'étalonnage d'un satellite à l'autre d'une même série. La conclusion

est que, tant que l'on n'aura pas mis au point une technique d'étalonnage à bord, il faudra examiner soigneusement les données de radiomètre dans les canaux du visible, pour trouver des anomalies provenant des algorithmes d'étalonnage nominaux.

• Étalonnage des canaux dans l'infrarouge

À la différence des canaux dans le visible, les canaux dans l'infrarouge sont continuellement étalonnés à bord du satellite. Une relation linéaire est établie entre les comptes numériques du radiomètre et la luminance énergétique. Les coefficients d'étalonnage peuvent être estimés pour chaque ligne balayée en utilisant deux mesures de référence. On obtient un point de référence froid en regardant l'espace qui agit comme corps noir à environ 3 K, c'est essentiellement une source de rayonnement nulle. On obtient l'autre point de référence à partir d'un corps noir interne dont on surveille la température. La fonction de Planck (voir section 8.3.2) donne alors la luminance énergétique ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$) pour chaque longueur d'onde. On utilise une relation linéaire entre la luminance énergétique et les comptes numériques dérivés des points fixes. On fait aussi une petite correction non linéaire.

Des difficultés de toutes sortes peuvent surgir. Par exemple, durant quelques mois d'automne, l'étalonnage des données du canal 3 de NOAA-10 a subi de graves erreurs (indiquant des températures trop élevées). La raison n'en est pas claire, mais cela peut être provoqué dans le cas où le satellite, au noeud ascendant, passe de conditions éclairées à des conditions sombres. De rapides variations de la température du corps noir interne pourraient alors se produire et l'application d'un algorithme constant d'étalonnage pourrait être incorrect.

• Étalonnage des sondeurs HIRS et MSU

Dans le cas du HIRS (voir Annexe 8.B), les mesures d'étalonnage sont faites toutes les 40 lignes de balayage et elles occupent trois lignes de balayage (pour lesquelles aucune donnée vidéo de la Terre n'est disponible). La procédure est essentiellement la même que pour l'AVHRR, on utilise les deux températures connues. Pour le MSU (voir Annexe 8.B), la séquence d'étalonnage a lieu en fin de chaque ligne de balayage et ainsi aucune donnée vidéo de la Terre n'est perdue. Là encore l'étalonnage en deux points se fait à partir des sources de référence chaude et froide. Toutefois, pour les fréquences de canaux MSU et les températures types de vue de la Terre du MSU, les rayonnements mesurés sont dans la queue Rayleigh-Jeans de la fonction de Planck, où la luminance énergétique est proportionnelle à la température de luminance. Les données peuvent donc être étalonnées directement en température de luminance (voir section 8.3.2).

8.3.1.4 Numérisation

La numérisation de la luminance énergétique fournit un certain nombre de valeurs discrètes séparées par des pas constants. Les différences de température correspondant à ces pas dans la luminance énergétique définissent les quanta de température dans l'image finale. A cause de la non-linéarité de la fonction corps noir avec la température, la taille de ces pas dépend de la température. Les données AVHRR sont numérisées en utilisant 10 bits et fournissent donc 1 024 valeurs différentes. Pour les canaux dans l'infrarouge thermique, le pas de température à 300 K est d'environ 0,1 K, mais il est de 0,3 K à 220 K.

D'autres systèmes sont numérisés en utilisant des nombres différents de bits. Les images infrarouges de Météosat utilisent 8 bits, mais les canaux dans le visible et la vapeur d'eau n'ont que 6 bits significatifs. Les tests ont démontré, de manière intéressante, qu'une image satellite monochrome peut être affichée sans dégradation sérieuse en n'utilisant que l'équivalent de 5 bits.

8.3.1.5 Correction géométrique

Les ordinateurs numériques sont ceux qui répondent le mieux aux exigences de traitement rapide de grandes quantités de données. Dans un système opérationnel, la tâche de calcul la plus intensive consiste à transformer la projection selon laquelle l'image est affichée. Cela est nécessaire, en partie à cause des distorsions dues à la vue de la courbe terrestre avec un miroir à balayage, et en partie à cause du besoin d'utiliser des images en association avec d'autres données météorologiques sur fond de carte standard. Connaître la position de chaque pixel sur la Terre (navigation) est un élément clé du processus de correction géométrique de l'image, telle qu'elle est vue de l'espace («space-view»), pour correspondre à la projection voulue. On y parvient en connaissant les caractéristiques orbitales du satellite (fournies par l'exploitant de satellite), l'heure précise à laquelle chaque ligne d'image a été enregistrée, et la géométrie du balayage.

Dans la pratique, la correction géométrique s'effectue de la façon suivante. On utilise les données orbitales et la géométrie de la projection finale pour situer la position, au sein de la scène vue de l'espace, qui correspond au centre de chaque pixel dans l'image finale reprojectée. Les valeurs des pixels en ce point et dans son voisinage servent à calculer une nouvelle valeur. Il s'agit effectivement d'une moyenne pondérée des valeurs voisines que l'on affecte au pixel dans l'image finale.

On a étudié de nombreuses méthodes sophistiquées pour obtenir cette moyenne pondérée. La plupart d'entre elles ne conviennent pas pour les applications en temps quasi réel à cause de l'énorme effort de calcul nécessaire. Toutefois, on s'attend à ce que cela change vu la disponibilité croissante d'une informatique de traitement en parallèle.

8.3.2 Profils verticaux de la température et de l'humidité

8.3.2.1 Le système sondeur vertical opérationnel de TIROS

Les satellites de la série TIROS-N/NOAA-A ont à leur bord le système TOVS, qui se compose des instruments HIRS et MSU. Ils observent le rayonnement ascendant depuis la Terre et l'atmosphère qui est donné par l'équation de transfert radiatif (ETR) :

$$L_\lambda = B_\lambda(T(P_s))\tau_\lambda(P_s) + \int_{P_s}^0 B_\lambda(T(p))\frac{d\tau_\lambda(p)}{dp}dp \quad (8.13)$$

où B_λ est la fonction de Planck pour la longueur d'onde λ ; L_λ est l'éclairement énergétique ascendant ; $T(p)$ est la température en fonction de la pression p ; P_s est la pression en surface et τ_λ la transmittance.

Le premier terme représente la contribution de la surface terrestre, le second est le rayonnement de l'atmosphère. $d\tau_\lambda/dp$ s'appelle la fonction de pondération.

Le calcul de l'ETR est la base du sondage atmosphérique. L'éclairement énergétique ascendant au sommet de l'atmosphère provient d'une combinaison de la fonction de Planck et de la transmittance spectrale. La fonction de Planck achemine l'information de température ; la transmittance est associée à l'absorption et au profil de la densité des gaz à effet radiatif ; enfin la fonction de pondération contient l'information du profil. La fonction de pondération culminera à différentes altitudes selon les différentes longueurs d'onde. On peut bâtir des sondages de température si on peut choisir un ensemble d'intervalle de longueurs d'onde tels que les luminances énergétiques correspondantes proviennent, jusqu'à un certain point, de différentes couches de l'atmosphère. La figure 8.7 montre des fonctions de pondération types qui ont été utilisées pour le traitement des données du HIRS.

Le calcul de l'ETR est très complexe, surtout à cause du chevauchement des fonctions de pondération montrées à la figure 8.7. On a développé un certain

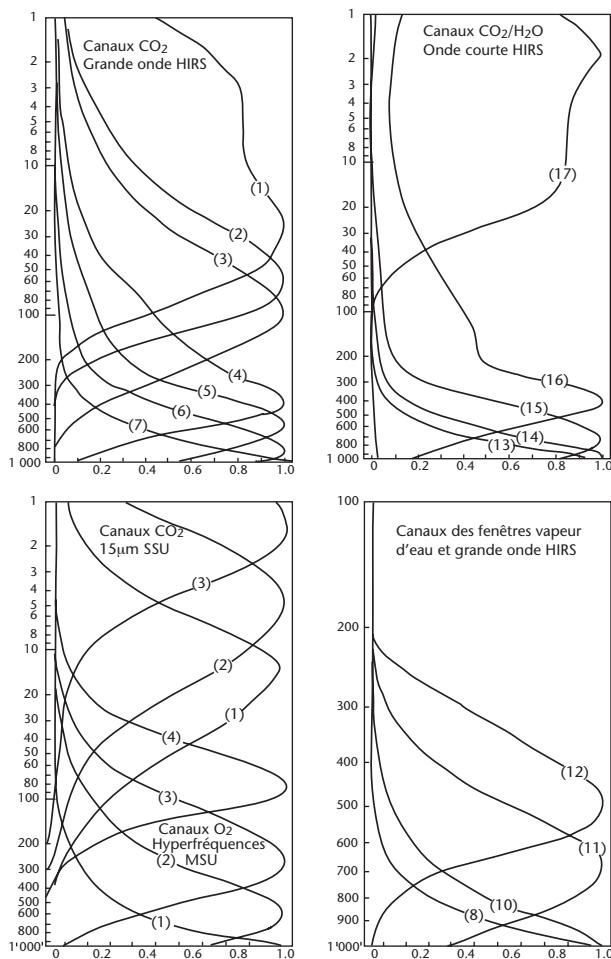


Figure 8.7.
Fonctions de pondération TOVS (normalisées)

nombre de méthodes pour en dériver des profils de température et d'humidité. Smith (1985) fait un relevé général de plusieurs méthodes et les développements sont communiqués dans les rapports successifs des Conférences d'étude TOVS (CIMSS, 1991).

Des méthodes antérieures largement utilisées étaient basées sur des régressions entre les luminances énergétiques et la réalité de terrain (provenant des radiosondes), sous des conditions atmosphériques variées. Les meilleurs résultats ont été obtenus des calculs de l'ETR, décrits en tant qu'extraction physique.

Le principe fondamental selon lequel on calcule la concentration de vapeur d'eau est illustré par une procédure utilisée dans certains mécanismes d'extraction physique. On calcule le profil de la température en se servant des longueurs d'onde auxquelles le dioxyde de carbone émet, on le calcule aussi à partir des longueurs d'onde auxquelles la vapeur d'eau émet, avec une distribution verticale supposée de la vapeur d'eau. La différence entre les deux profils de

la température provient de la différence qu'il y a entre les profils de la vapeur d'eau supposé et réel et, on peut donc en déduire le profil réel.

Dans la plupart des Services météorologiques, l'extraction des grandeurs géophysiques à utiliser dans la prévision météorologique numérique s'effectue à partir de méthodes physiques. À la NOAA, les données sont extraites par l'obtention d'une première approximation en appliquant une méthode de recherche en bibliothèque, suivie d'une extraction physique totale basée sur un calcul de l'ETR. D'autres Services météorologiques, comme le *Met Office* du Royaume-Uni et le Bureau australien de météorologie, utilisent une première approximation de modèle numérique suivie d'un calcul complet de l'ETR.

Le plus récent développement est une tendance vers une solution variationnelle de l'ETR en présence de toutes les autres données disponibles au moment de l'analyse. Cela peut être étendu à quatre dimensions pour permettre la contribution des données non synoptiques sur une période de temps appropriée.

Toutes les méthodes doivent nécessairement identifier et utiliser les pixels sans nuages, ou alors tenir compte des effets des nuages. Les procédures pertinentes sont décrites dans la section 8.3.3.

8.3.2.2 L'effet de limbe

L'effet de limbe est illustré à la figure 8.8. À mesure que l'angle de visée s'écarte de la verticale, la longueur de cheminement du rayonnement à travers l'atmosphère augmente. Donc, les transmittances depuis tous les niveaux vers l'espace décroissent et le pic de la fonction de pondération s'élève. Si le canal perçoit un rayonnement d'une couche atmosphérique dans laquelle il y a un gradient thermique vertical, alors la luminance énergétique mesurée va changer ; pour les canaux troposphériques, elle tendra à décroître. Pour certaines applications, il est donc nécessaire de convertir les luminances énergétiques mesurées pour estimer la température de luminance qui aurait été mesurée si l'instrument avait vu le même volume verticalement. On peut appliquer la méthode de correction du limbe ou bien une méthode d'extraction physique.

Les corrections de limbe sont appliquées aux températures de luminance mesurées à un angle au nadir non nul. Elles sont possibles parce que la fonction de pondération d'une vue au nadir pour un canal culmine, généralement, à un niveau intermédiaire entre les pics de la fonction de pondération de deux canaux à l'angle de mesure. Donc, pour un angle donné, θ , nous pouvons exprimer la différence entre la température de luminance au nadir et à l'angle

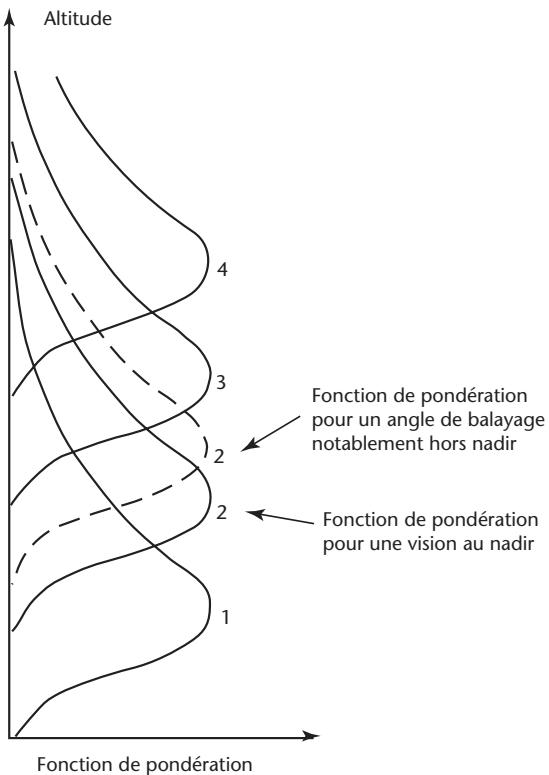


Figure 8.8. Illustration schématique d'un groupe de fonctions de pondération pour vision au nadir et effet du balayage hors nadir sur une de ces fonctions.

de mesure sous forme de combinaison linéaire des températures de luminance mesurées dans un certain nombre de canaux :

$$(T_B)_i^{\theta=0} - (T_B)_i^\theta = a_{0i}^\theta + \sum_{j=1}^J a_{ji}^\theta (T_B)_j^\theta \quad (8.14)$$

On obtient les coefficients a_{ji}^θ par régression linéaire multiple des températures de luminance synthétiques calculées pour un jeu représentatif de profils.

Il est possible d'éliminer le besoin d'une correction de limbe. Par exemple, on peut utiliser un algorithme d'extraction de température avec un jeu différent de coefficients de régression pour chaque angle de balayage. Toutefois, si on effectue une extraction de régression dans laquelle on utilise un jeu de coefficients (approprié à un angle de balayage nul), nous devons convertir toutes les températures de luminance pour un même angle de visée, habituellement le nadir.

La faiblesse de la méthode de régression appliquée à l'effet de limbe est la difficulté d'établir des régressions pour différents régimes de couverture nuageuse, de température et d'humidité. Une meilleure méthode, qui est maintenant devenue opérationnelle

dans certains centres, consiste à utiliser la méthode d'extraction physique dans laquelle l'équation de transfert radiatif est résolue pour chaque angle de balayage pour lequel il faut des mesures.

• *Balayage en mode limbe pour les sondages*

Les sondeurs météorologiques opérationnels regardent la surface terrestre à la verticale au-dessous du satellite, mais une méthode alternative consiste à observer le limbe de la Terre. Les fonctions de pondération sont très précises pour les capteurs balayant en mode limbe et culminent toujours à la pression la plus élevée dans le champ de visée. On obtient donc une bonne résolution verticale (1 km) avec une résolution horizontale de 10 km environ. Le sondage à la verticale permet des résolutions quelque peu plus faibles, bien qu'il ne soit pas possible d'effectuer des mesures à une altitude inférieure à 15 km environ avec des techniques de sondage au limbe ; par conséquent, il est nécessaire de recourir au sondage vertical pour les mesures troposphériques.

8.3.2.3 Résolution et exactitude

Il est difficile d'évaluer l'exactitude des extractions de données de satellite. De même que pour de nombreux autres systèmes d'observation, nous sommes confrontés à la question de savoir « où est la vérité ? ». L'étude des statistiques sur les différences entre les extractions et les profils de radiosonde au même endroit est une méthode très répandue d'évaluation de l'exactitude. De telles statistiques vont comprendre les erreurs d'extraction, mais aussi les contributions des erreurs de radiosonde (qui comprennent les effets des deux écarts par rapport au profil vrai le long de la trajectoire de montée de la radiosonde et par rapport au degré auquel ce profil est représentatif du volume environnant de l'atmosphère) et les contributions des erreurs de localisation causées par la séparation spatiale et temporelle entre le sondage par satellite et l'ascension de la radiosonde. Bien que les statistiques de superposition extraction-radiosonde soient très utiles, il ne faudrait pas les traiter simplement comme des mesures d'erreur d'extraction.

• *Températures de luminance*

Il est important de remarquer la forte non-linéarité dans les équations de conversion des luminances énergétiques en températures de luminance. Cela signifie que, lorsque l'on effectue des traitements avec les températures de luminance, l'exactitude de mesure de la température vraie faite par le radiomètre varie avec la température. Ce n'est pas le cas quand on traite des luminances énergétiques, car celles-ci sont reliées linéairement aux comptes du radiomètre. Dans l'AVHRR, les trois canaux dans l'infrarouge ont tous une exactitude qui chute rapidement pour les basses températures. On peut le voir à la figure 8.9 (qui ne montre que deux canaux).

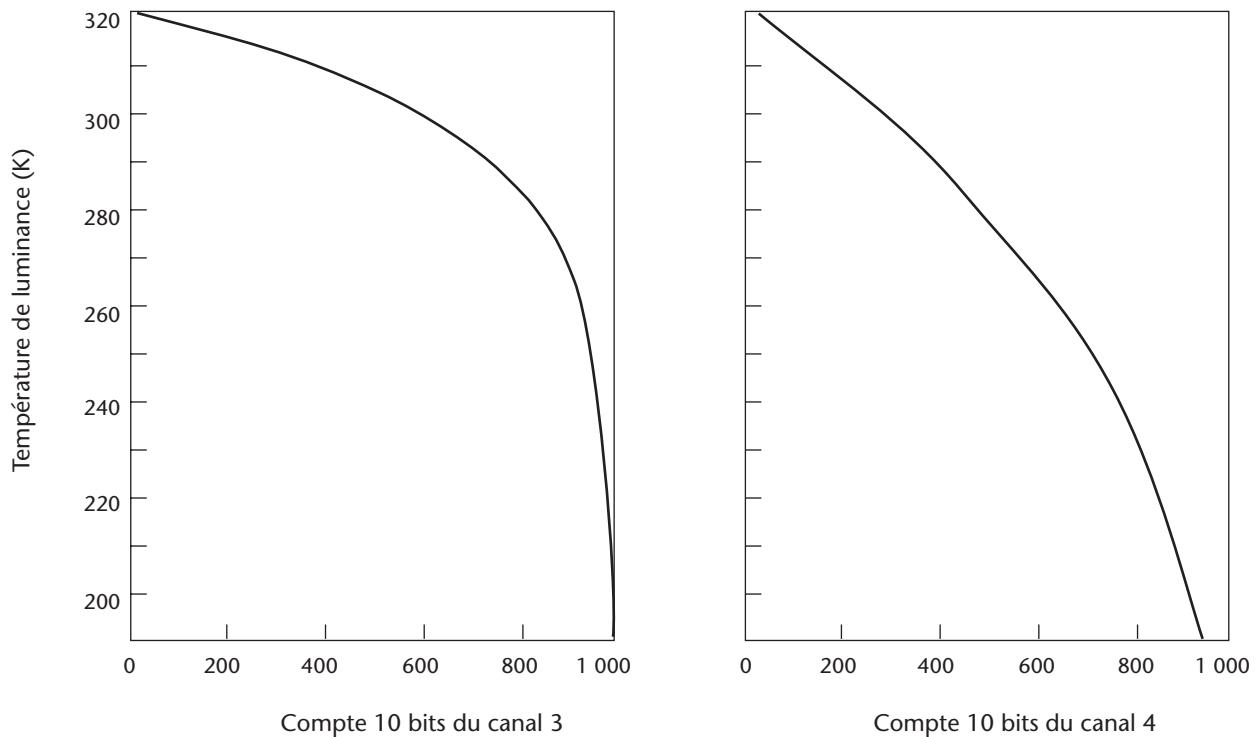


Figure 8.9.

Courbes typiques d'étalonnage pour convertir les comptes numériques des canaux 3 et 4 de l'AVHRR en températures de luminance. La courbe d'étalonnage pour le canal 5 de l'AVHRR est très semblable à celle du canal 4 de l'AVHRR.

Tableau 8.5. Incertitude (K) des canaux AVHRR dans l'infrarouge

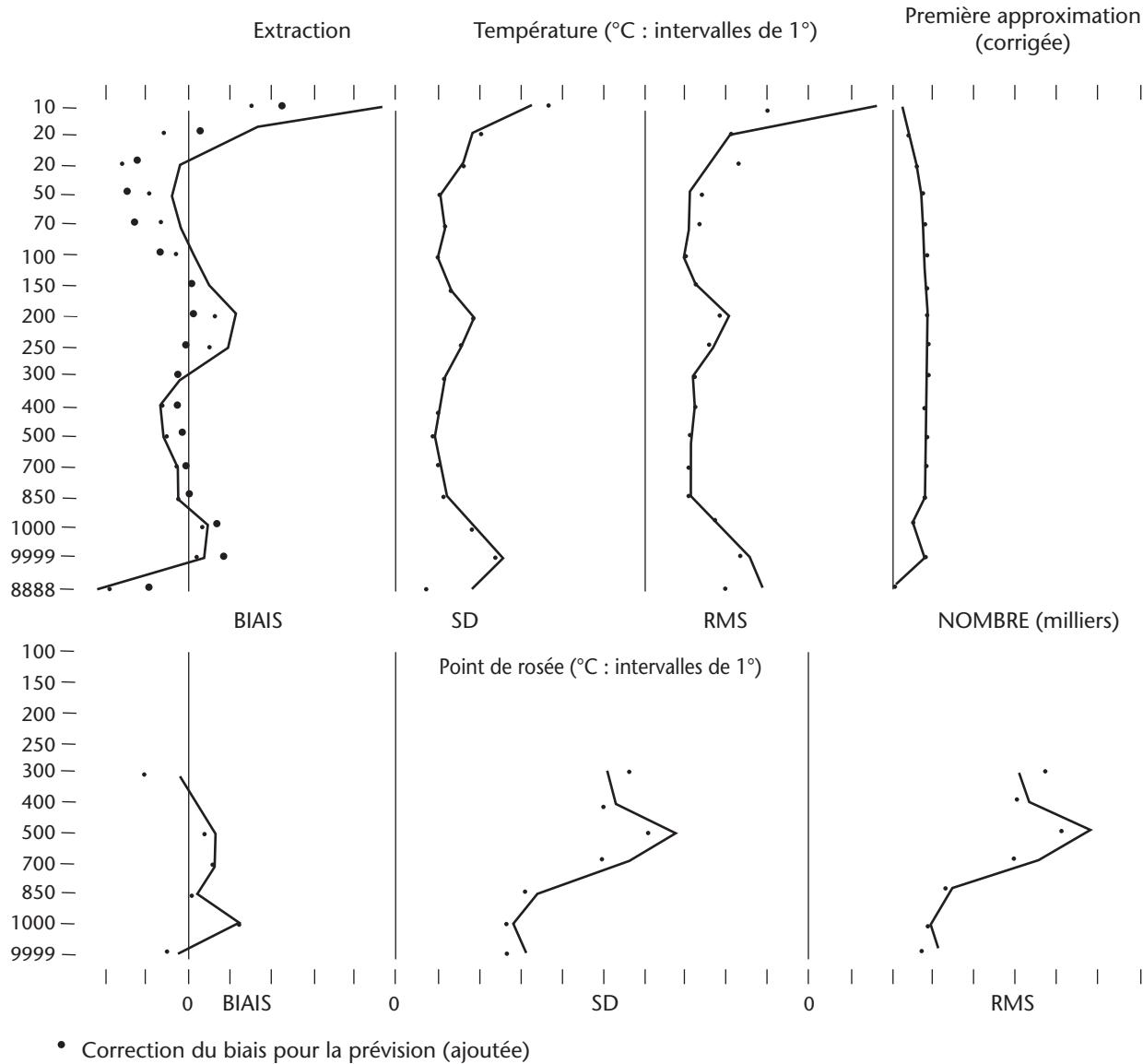
Température (K)	Canal 3	Canal 4
200	~ 10	~ 0,3
220	2,5	0,22
270	0,18	0,10
320	0,03	0,06

Des comparaisons d'exactitude de mesure pour le canal 3 (Annexe 8.A) et le canal 4 font ressortir quelques différences. Quand on traite des valeurs 10 bits, les incertitudes sont celles indiquées au tableau 8.5. Pour le canal 3, la non-linéarité est plus forte que pour le canal 4, d'où beaucoup moins de précision pour les basses températures que dans le canal 4. Le canal 5 est très semblable au canal 4. Le canal 3 est beaucoup moins précis aux basses températures, mais meilleur que le canal 4 aux températures supérieures à 290 K.

• Sondages

La figure 8.10 indique les statistiques de différence typiques dans le système d'extraction du *Meteorological Office* du Royaume-Uni. Elle montre les profils de biais et d'écart type pour les différences extraction-

radiosonde. Ces dernières sont basées sur toutes les superpositions obtenues à partir des extractions de NOAA-11 en juillet 1991, les critères de superposition étant une séparation temporelle de 3 heures et une séparation horizontale de 150 km. Si le jeu de profils dans les superpositions est important et que les deux sont représentatifs de la même population, alors les biais dans ces statistiques devraient être très faibles. On peut s'attendre ici à ce que les biais rencontrés soient de 1 degré environ à certains niveaux de pression, alors que les superpositions pour une période de temps et une surface limitées peuvent ne pas être représentatives d'un ensemble zonal. Alors que les écarts types sont plus importants que les valeurs équivalentes des seules erreurs d'extraction, ils font ressortir certaines des caractéristiques attendues du profil d'erreur d'extraction. Ils ont une valeur minimale dans la moyenne troposphère et des valeurs plus élevées au voisinage de la surface et de la tropopause. Les valeurs troposphériques plus faibles reflètent les problèmes associés à la contamination résiduelle des nuages et aux différents effets de surface. Les inversions aux niveaux inférieurs tendent aussi à provoquer des problèmes d'extraction. Les valeurs pour la tropopause reflètent le manque d'information sur les luminances énergétiques de cette partie du profil ainsi que la tendance de la méthode d'extraction à «lisser» les caractéristiques de ce type.



8888 T8 ; 9999-1,5 m ; Toutes positions de balayage ; Aucune route 1+2 ; Tous instants ; Toutes surfaces (terre + mer) ; BTRP \geq - 300 ; Élévation \leq 500 m ; Distance entre col 0-150 km.
Nombre total de profils 9856 ; Sonde NOK 2122 ; BTRP NOK 1 ; Route NOK 166 ; Élévation NOK 794.

Figure 8.10. Statistiques d'erreurs pour les profils verticaux (Office météorologique du Royaume-Uni)

• Résolution

Le champ de visée du radiomètre HIRS (tableau 8.3) est de 17 km environ au point sous-satellite et les calculs de profil peuvent être faits en bordure de fauchée, où le champ est elliptique avec un axe de 55 km environ. Des profils peuvent être calculés pour n'importe quelle maille de grille horizontale, mais ils ne sont pas indépendants s'ils sont plus rapprochés que le champ de visée.

Les sondages de température sont calculés, vers le bas, jusqu'au sommet des nuages ou, si on utilise un instrument MSU, jusqu'à la surface. Au-dessus du sol et au voisinage des côtes, la variabilité ho-

izontale de la température et de l'émissivité provoque des incertitudes qui limitent leur utilisation, dans les modèles numériques, au-dessous d'environ 500 hPa.

La résolution verticale des observations est liée aux fonctions de pondération et elle est typiquement de 3 km environ. Cette résolution verticale médiocre est l'une des principales insuffisances du système de sondage actuel pour la prévision numérique ; elle sera améliorée dans la prochaine génération d'instruments de sondage, comme le sondeur infrarouge atmosphérique (AIRS) et l'interféromètre de sondage à haute résolution (HIS).

8.3.3 Caractéristiques des nuages et de la surface terrestre et élimination des nuages

8.3.3.1 Observation des nuages et de la surface terrestre

Le schéma développé par le *Meteorological Office* du Royaume-Uni est caractéristique de ceux qui peuvent être utilisés pour extraire de l'information sur les nuages et la surface. Il fait subir une succession de tests à chaque pixel d'une scène dans un but d'identification des nuages. Le premier est un test de seuil dans l'infrarouge ; essentiellement, tous les pixels dont la température est inférieure à une température spécifiée sont réputés nuageux.

Le deuxième test examine la différence locale des températures au sein d'une image. Les valeurs élevées indiquent soit des mélanges de pixels clairs et nuageux, soit des pixels nuageux à différents niveaux. Les valeurs faibles aux basses températures indiquent des pixels totalement nuageux.

Les températures de luminance d'un objet dans différents canaux dépendent des variations avec la longueur d'onde, de l'émissivité de l'objet et de l'atténuation du rayonnement par l'atmosphère. Pour les nuages minces, les températures dans le canal 3 (3,7 µm) de l'AVHRR (Annexe 8.A) sont plus chaudes que les températures dans le canal 4 (11 µm) (voir Figure 8.11(a)). L'inverse est vrai pour les nuages bas et épais, ce qui est la base du dispositif de détection de brouillard décrit par Eyre, Brownscombe et Allam (1984) (voir Figure 8.11(b)). La différence entre les canaux 4 et 5 de l'AVHRR (11 µm et 12 µm) est sensible à l'épaisseur du nuage et au contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Un seuil appliqué à cette différence facilite la détection des cirrus minces.

Pendant la journée, on peut aussi utiliser le rayonnement solaire réfléchi, corrigé afin d'éliminer les effets des variations d'élévation du Soleil. Un test de seuil sépare les nuages brillants des surfaces sombres. Un quatrième test fait intervenir le rapport entre la luminance énergétique du canal 2 (0,9 µm) dans le proche infrarouge et celle du canal 1 (0,6 µm) dans le visible. Ce rapport a une valeur qui est :

- (a) proche de l'unité pour les nuages ;
- (b) de 0,5 environ pour l'eau, par suite de la rétrodiffusion accrue par les aérosols aux longueurs d'onde courtes ;
- (c) de 1,5 environ pour le sol, et en particulier pour la végétation en cours de croissance, par suite de la réflectance élevée des structures feuillues dans le proche infrarouge.

Une fois que l'on a localisé les pixels non contaminés par les nuages, en appliquant ces méthodes, il est possible de déterminer certains paramètres de la surface. Le plus important parmi ceux-ci est la température de la mer en surface (section 8.3.6). Les surfaces des terres émergées ont des émissivités fortement variables, ce qui rend les calculs très incertains.

On peut extraire les paramètres relatifs aux nuages en utilisant des extensions des séries de tests décrits précédemment. Ces paramètres comprennent les températures au sommet des nuages, la fraction de ciel couvert, et l'épaisseur optique.

On peut calculer l'altitude du sommet des nuages de plusieurs façons. La plus simple est d'utiliser les températures de luminance d'un ou plusieurs canaux, pour calculer la température au sommet des nuages, puis de déduire l'altitude à partir d'un profil de la température, habituellement dérivé d'un modèle numérique. Cette méthode fonctionne bien pour les champs importants de nuages stratiformes et cumuliformes, mais pas pour les nuages semi-transparentes, comme les cirrus, ou pour les champs de petits nuages cumuliformes. Smith et Platt (1978) ont montré comment utiliser l'équation de transfert radiatif dans des paires voisines de canaux HIRS afin de calculer la pression et, donc, l'altitude du sommet de nuages épars ou de nuages minces, avec des erreurs généralement entre la moitié et le quart de l'épaisseur nuageuse des couches semi-transparentes.

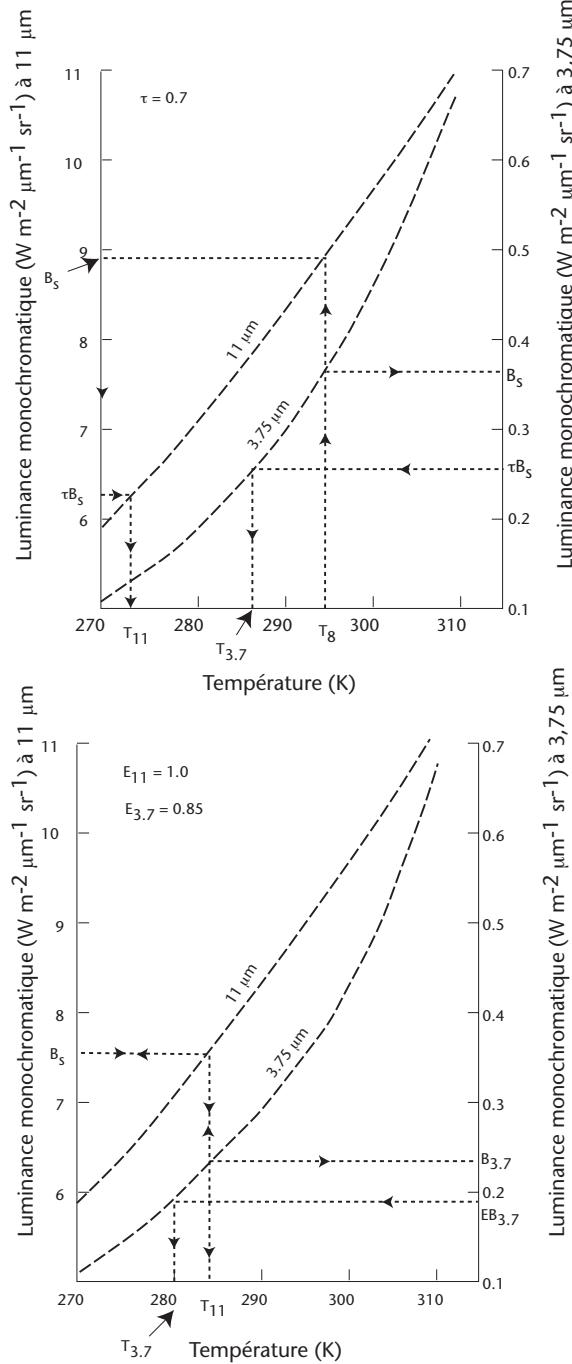
Il faudrait insister sur le fait que de tels produits ne peuvent être obtenus qu'à partir de flux de données qui contiennent des données précises d'étalonnage.

Ces données ne peuvent être considérées comme images que lorsqu'elles sont affichées sur un dispositif approprié. Bien que, dans certains cas, on ne les extrait que dans l'intention d'obtenir des variables d'entrée pour les modèles numériques de mésoscale, on peut obtenir beaucoup d'information utile en les visionnant. On utilise différentes combinaisons de canaux de radiomètre pour définir des types particuliers de nuages, de neige et de végétation, comme le montre par exemple la figure 8.12.

8.3.3.2 Sondages du sondeur vertical opérationnel de TIROS en présence de nuages

• Élimination des nuages

Les luminances énergétiques dans l'infrarouge sont nettement affectées par la présence de nuages puisque ces derniers sont, pour la plupart, pratiquement opaques dans cette gamme de longueur d'onde. Par conséquent, les algorithmes utilisés dans l'extraction de la température troposphérique doivent pouvoir détecter les nuages qui ont un effet important



(a) L'effet des nuages semi-transparents sur les luminances

La luminance de surface B_S est réduite à tB_S par les nuages semi-transparents. La température correspondant à tB_S est plus élevée pour 3,7 μm que pour 11 μm.

(b) L'effet des différentes émissivités sur les luminances.

La luminance reçue par le satellite B_{Sat} est :

$$B_{Sat} = E B(T_S)$$

où E est l'émissivité ; B est la fonction corps noir ; T_S est la température en surface.

Pour les nuages bas et le brouillard :

$$E_{11 \mu m} \approx 1,0$$

$$E_{3,7 \mu m} \approx 0,85$$

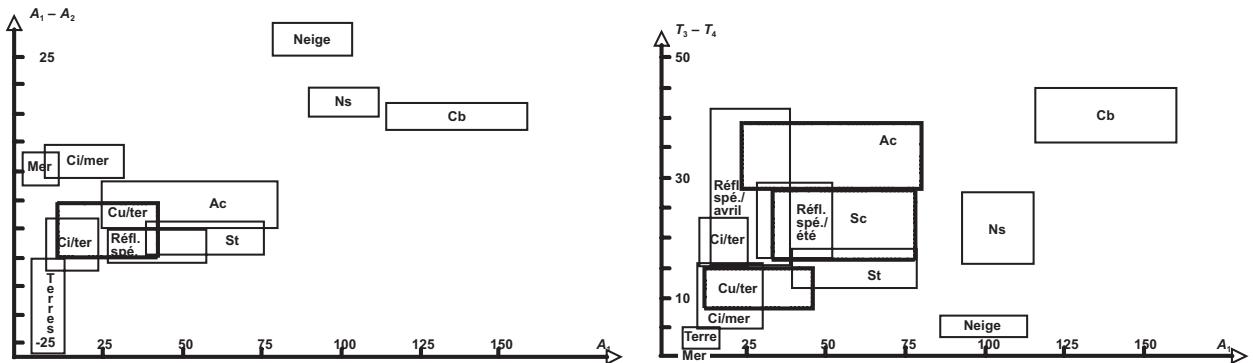
La température correspondant à $E B(T_S)$ est plus élevée pour 11 μm que pour 3,7 μm.

Figure 8.11. Calcul de la température en présence de nuages

sur les luminances énergétiques et, si possible, tenir compte de ces effets. On y parvient habituellement en corrigeant les luminances énergétiques mesurées afin d'obtenir des valeurs dites «clear-column» (signifiant «hors-nuages»), c'est-à-dire les luminances énergétiques qui seraient mesurées à partir des mêmes profils de la température et de l'humidité en l'absence de nuages. Dans bien des schémas d'extraction, le processus d'inversion convertit les luminances énergétiques «hors-nuages» en paramètres

atmosphériques, c'est pourquoi il faut une étape préliminaire d'élimination des nuages.

La plupart des algorithmes développés sont des variantes du champ de visée adjacent ou méthode N* (Smith, 1985). Dans cette approche, les luminances énergétiques mesurées, R_1 et R_2 , dans deux champs de visée adjacents (ci-après appelés «spots») d'un canal de radiomètre peuvent, dans certaines conditions, s'exprimer ainsi :



(a) Neige, cumulonimbus (Cb), nimbostratus (Ns), altocumulus (Ac), cumulus (Cu) au-dessus des terres, cirrus (Ci) au-dessus des terres et de la mer, réflexion spéculaire, stratus, terres et mer dans l'espace de caractéristiques $A_1 - (A_1 - A_2)$. Cette figure est extraite de la base de données pour l'été, satellite NOAA-10 et élévation du Soleil d'environ 40°.

(b) Classes d'objets dans l'espace de caractéristiques $A_1 - (T_3 - T_4)$. Tiré de la même section de base de données que pour (a). La séparabilité de la neige et des nuages est apparente. La discrimination entre les stratus et la réflexion spéculaire en été est un problème. La réflexion spéculaire au printemps est également incluse.

Figure 8.12. Identification des caractéristiques des nuages et de la surface

$$R_1 = N_1 R_{nuageux} + (1 - N_1) R_{clair} \quad (8.15)$$

$$R_2 = N_2 R_{nuageux} + (1 - N_2) R_{clair}$$

où R_{clair} et $R_{nuageux}$ sont, respectivement, les luminances énergétiques appropriées aux conditions par ciel clair et par ciel totalement couvert ; N_1 et N_2 sont les fractions réelles de couvertures nuageuses dans les spots 1 et 2.

Dans ces équations on a fait les hypothèses suivantes :

- (a) le profil atmosphérique et les caractéristiques de surface sont les mêmes dans les deux spots ;
- (b) il n'y a qu'une seule couche de nuages ;
- (c) l'altitude (et la température) du sommet des nuages est le même dans les deux spots.

Si les fractions de couvertures nuageuses diffèrent dans les deux spots ($N_1 \neq N_2$), alors l'équation 8.15 peut être résolue simultanément pour obtenir la luminance énergétique hors-nuages :

$$R_{clear} = \frac{R_1 N^* R_2}{1 - N^*} \quad (8.16)$$

où $N^* = N_1 / N_2$.

Cette méthode a été considérablement élaborée, en utilisant les canaux HIRS et MSU dont la résolution horizontale est suffisante pour que les hypothèses se vérifient suffisamment souvent. Dans cette méthode, on utilise la régression entre les mesures superposées dans le canal MSU numéro 2 et les canaux HIRS ; les coefficients sont régulièrement mis à jour, une fois par semaine habituellement.

On applique maintenant des méthodes plus récentes, en se servant des données AVHRR pour aider à éclaircir le champ de visée HIRS. En outre, des méthodes d'extraction physique totale sont disponibles, grâce aux données AVHRR et TOVS, dans lesquelles la fraction de couverture nuageuse, ainsi que l'altitude et la quantité de nuages, peuvent être explicitement calculées à partir des luminances énergétiques observées.

8.3.4 Mesures du vent

8.3.4.1 Vents mesurés par nuage traceur

Les vents mesurés par nuage traceur sont obtenus à partir des images de satellite géostationnaire en suivant la trajectoire du sommet des nuages, habituellement pendant deux périodes d'une demi-heure entre deux images infrarouges successives. L'exactitude des vents dépend de jusqu'à quel point le déplacement du nuage est représentatif du vent (par exemple, un amas nuageux convectif peut se déplacer à la vitesse d'une perturbation atmosphérique de méso-échelle, et non pas à la vitesse d'un vent identifiable). Elle dépend aussi du degré auquel il est possible de déterminer une altitude représentative des nuages à partir du champ de température de luminance. En outre, l'exactitude des vents dépend de l'intervalle de temps et, jusqu'à un certain point, des corrélations entre les images de nuages utilisées dans le calcul de ces vents, de la résolution spatiale de ces images, de l'erreur dans les premières approximations, du degré jusqu'auquel la première approximation limite la recherche de configurations corrélées dans les images séquentielles, et de l'importance du développement se produisant au sein des nuages.

Les différences typiques moyennes de vecteur entre les vents mesurés par nuage traceur et les vents mesurés par des radars de mesure du vent à 100 nm étaient, sur une période de un mois, de 3, 5 et 7 m s⁻¹ pour les nuages bas, moyens et élevés, respectivement. Ceci indique que les erreurs sont comparables, aux niveaux inférieurs, à celles des mesures conventionnelles.

Le processus d'estimation du vent est d'ordinaire entièrement automatique. On choisit des zones nuageuses cibles d'environ 20 x 20 pixels dans les images semi-horaires, à partir de critères qui comprennent une gamme appropriée de températures de luminance et de gradients au sein de chaque zone d'essai. Une fois les cibles choisies, on procède à un repérage automatique, en utilisant généralement une analyse numérique prévue, à échéance de six ou douze heures, comme première approximation pour rechercher des zones cibles bien corrélées. On peut se servir des écarts quadratiques moyens pour comparer les séries de températures de luminance de la cible et des zones de recherche afin d'évaluer le déplacement. La première approximation réduit la taille de la zone de recherche nécessaire à l'obtention du vecteur vent, mais elle restreint aussi les résultats à une certaine plage de champ de vent prévu.

On affecte des drapeaux d'erreur à chaque mesure sur la base de plusieurs caractéristiques comprenant les différences entre les vecteurs semi-horaires successifs et la différence entre la mesure et la première approximation. On peut utiliser ces drapeaux dans l'analyse numérique pour pondérer convenablement les données.

Le nombre de mesures pour chaque heure synoptique est, évidemment, limité par la présence de nuages appropriés et il est typiquement de l'ordre de 600 vecteurs par hémisphère.

Aux hautes latitudes, on peut utiliser les images séquentielles, provenant des satellites à orbite polaire, pour produire des vecteurs du déplacement des nuages aux latitudes que les satellites géostationnaires ne peuvent atteindre.

Un développement subséquent de la même technique consiste à calculer les vents de vapeur d'eau, en se servant des images satellite de la répartition de la vapeur d'eau.

8.3.4.2 Vents de surface mesurés par diffusomètre

Le diffusomètre est un instrument embarqué à bord du satellite expérimental ERS-1 qui effectue des mesures de vent systématiques à la surface de la mer.

Cette technique deviendra opérationnelle sur les satellites en cours de préparation.

Dès que le radar à hyperfréquences fut largement utilisé dans les années 40, on trouva qu'aux faibles angles de site, le terrain environnant (ou en mer, les vagues) provoquait de grands échos parasites. Depuis lors, les concepteurs et les utilisateurs d'équipements radar ont toujours cherché à réduire ce bruit. Les chercheurs travaillant sur cet effet ont trouvé que l'écho rétrodiffusé par la mer devient fort lorsque la vitesse du vent augmente, ce qui donne la possibilité de mesurer le vent à distance. Les radars conçus pour mesurer ce type d'écho s'appellent des diffusomètres.

La rétrodiffusion est principalement due à des réflexions cohérentes à partir d'une surface rugueuse ; pour les angles d'incidence de plus de 20° environ par rapport à la verticale, cela se produit lorsque la condition de Bragg est satisfaite :

$$\Lambda \sin\theta_i = n\lambda/2 \quad (8.17)$$

où Λ est la longueur d'onde de la rugosité de surface ; λ est la longueur d'onde du radar ; θ_i est l'angle d'incidence et $n = 1, 2, 3 \dots$. La diffusion de Bragg de premier ordre ($n = 1$), en hyperfréquences, provient des rides (risée) engendrées par la tension instantanée du vent de surface. Le niveau de rétrodiffusion d'une cible étendue, comme la surface de la mer, est généralement appelé surface équivalente radar normalisée, ou σ^0 . Pour une géométrie et une puissance transmise données, σ^0 est proportionnelle à la puissance reçue en retour par le radar. En termes d'autres paramètres radar connus ou mesurables, on a :

$$\sigma^0 = \frac{P_R}{P_T} \cdot \frac{64\pi^3 R^4}{\lambda^2 L_S G_0^2 (G / G_0)^2 A} \quad (8.18)$$

où P_T est la puissance transmise et P_R la puissance reçue en retour par le radar ; R est la distance oblique à la cible de la zone A ; λ est la longueur d'onde du radar ; L_s comprend l'atténuation atmosphérique et autres pertes du système ; G_0 est le gain de crête de l'antenne et G/G_0 le gain d'antenne relatif dans la direction de la cible. L'équation 8.18 est souvent appelée l'équation du radar. σ^0 peut-être exprimée sous forme linéaire (comme ci-dessus) ou en décibels (dB) c'est-à-dire : $\sigma_{\text{dB}}^0 = 10 \log_{10} \sigma_{\text{lin}}^0$.

L'expérience tirée des diffusomètres fonctionnant au-dessus de l'océan prouve que σ^0 croît avec la vitesse du vent de surface (telle que mesurée par les navires ou les bouées), décroît avec l'angle d'incidence et dépend de l'angle du faisceau radar relativement à la direction du vent. La figure 8.13

est un relevé des données aéronef σ^0 par rapport à la direction du vent et pour différentes vitesses de vent. La direction 0° correspond à une observation par vent de face, 90° par vent de travers et 180° par vent arrière.

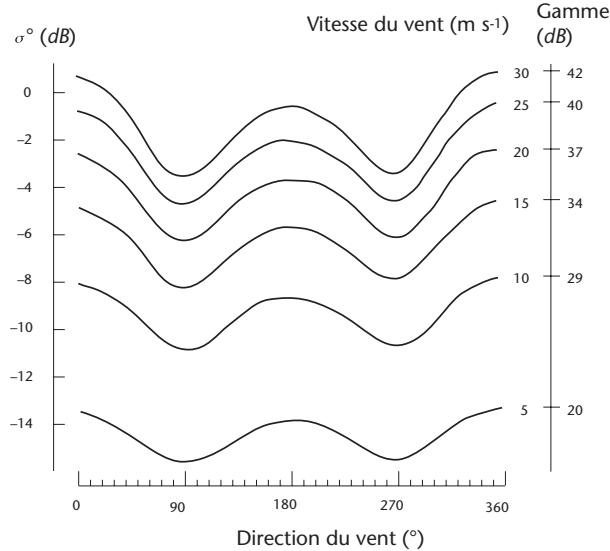


Figure 8.13. Rétrodiffusion mesurée, σ_0 (en décibels), par rapport à la direction relative du vent pour différentes vitesses de vent. Données pour 13 GHz, polarisation verticale.

L'Agence spatiale européenne a coordonné un certain nombre d'expériences pour confirmer ces types de courbes à 5,3 GHz qui est la fréquence d'exploitation de cet instrument à bord du satellite ERS-1. Plusieurs diffusomètres aéroportés ont effectué des mesures au voisinage de navires et de bouées instrumentés, dans la mer du Nord, l'Atlantique et la Méditerranée. Les données σ^0 sont ensuite corrélées avec le vent de surface, qui a été rectifié pour une hauteur habituelle d'anémomètre de 10 m (en supposant une stabilité neutre). On a adapté une fonction de modèle empirique à ces données sous la forme suivante :

$$\sigma^0 = a_0 \cdot U^\gamma (1 + a_1 \cos\phi + a_2 \cos\phi) \quad (8.19)$$

où les coefficients a_0 , a_1 , a_2 et γ dépendent de l'angle d'incidence. Ce modèle établit un rapport entre, d'une part la vitesse du vent en stabilité neutre U à 10 m et la direction du vent ϕ relative au radar, d'autre part la surface équivalente radar normalisée.

Il peut aussi y avoir le cas où σ^0 est fonction de la température de la mer en surface, de l'état de la mer et des nappes en surface (naturelles ou dues à l'homme). Encore faut-il démontrer que ces paramètres ont un quelconque effet significatif sur l'exactitude d'extraction du vecteur vent.

Puisque σ^0 fait ressortir une relation nette avec la vitesse et la direction du vent, en principe, le fait de mesurer σ^0 à deux ou plusieurs différents angles d'azimut permet d'extraire à la fois la vitesse et la direction du vent. Toutefois, la direction extraite peut ne pas être unique ; il peut y avoir des directions ambiguës.

C'est en 1978 qu'un diffusomètre vents a volé pour la première fois à bord d'un satellite — le diffusomètre du satellite SEASAT-A (SASS) — et qu'il a démontré efficacement l'exactitude de cette nouvelle forme de mesure. Les spécifications concernant l'exactitude de la moyenne quadratique étaient de 2 m s^{-1} pour la vitesse du vent et de 20° pour sa direction. Les comparaisons avec des mesures de vent conventionnelles ont montré que ces exigences étaient satisfaites, si l'on connaissait la direction approximative du vent, afin de choisir la meilleure dans le jeu ambigu des directions données par le SASS.

L'instrument SASS utilisait deux faisceaux de chaque côté du vaisseau spatial, alors que le diffusomètre ERS-1 utilise un troisième faisceau central pour améliorer la discrimination de la direction du vent ; mais il ne s'agit là que d'un instrument unilatéral, donc sa couverture est moindre. Les trois antennes émettent chacune un faisceau étroit d'énergie radar dans le sens horizontal, mais un large faisceau dans le sens vertical, ce qui se traduit par une bande étroite d'illumination de la surface de la mer sur la largeur de 500 km de la fauchée. À mesure que le satellite avance, le faisceau central, puis celui de l'arrière prennent des mesures de la même partie de l'océan que le faisceau avant. Donc dans chaque partie de la fauchée, divisée en carrés de 50 km de côté, σ^0 est l'objet de trois mesures effectuées dans différentes directions par rapport au vecteur vent de surface local.

La figure 8.14 montre la couverture du diffusomètre pour l'Atlantique Nord en 24 heures. Ces fauchées ne sont pas statiques et se décalent vers l'ouest, les jours suivants, pour combler les vastes manques. Même ainsi, la couverture n'est pas totale à cause de la largeur de fauchée relativement petite par rapport, par exemple, à l'imageur AVHRR à bord des satellites NOAA. Toutefois, un vent est potentiellement disponible tous les 50 km au sein de la zone couverte, globalement, et l'Agence spatiale européenne transmet cette information aux utilisateurs opérationnels dans les trois heures suivant la mesure. Les données instrumentales brutes sont enregistrées à bord et renvoyées aux stations au sol de l'Agence spatiale européenne à chaque orbite, la station principale se trouvant à Kiruna, dans le nord de la Suède, où les vecteurs vent sont calculés.

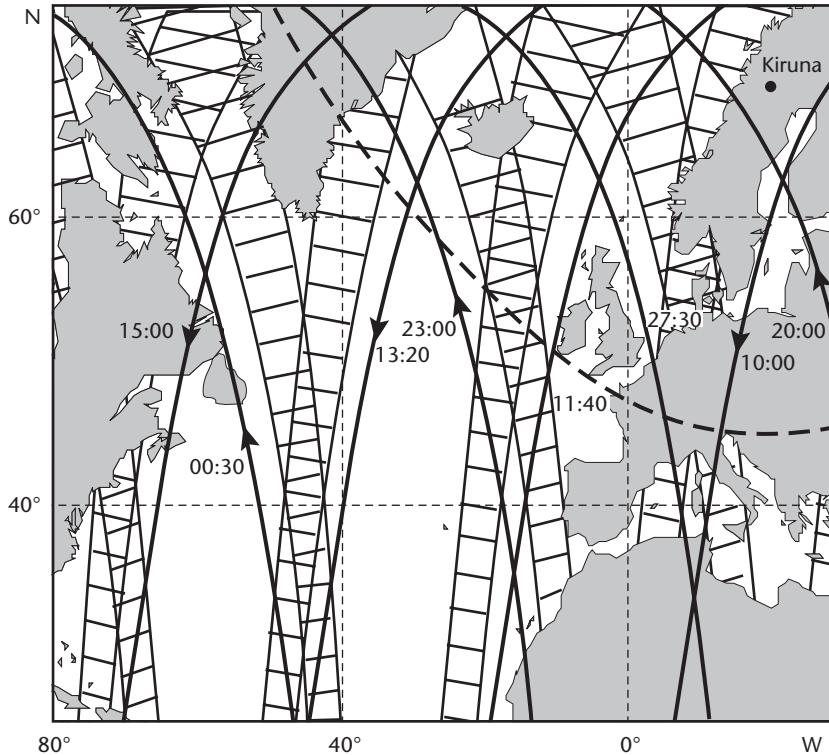


Figure 8.14. Traces sous satellite ERS-1 et couverture de diffusomètre vent de la région nord-atlantique pendant une journée. Les grands intervalles non couverts seront partiellement comblés les jours suivants ; cela se produit nominalement sur un cycle de trois jours. La ligne discontinue indique les limites de réception de la station terrestre de Kiruna en Suède.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le diffusomètre mesure principalement le niveau de puissance de la rétrodiffusion en un lieu donné sous différents angles d'azimut. Puisque nous connaissons la géométrie, comme la portée et les angles d'incidence, on peut utiliser l'équation 8.18 pour calculer un triplet de valeurs de σ^0 pour chaque cellule.

En théorie, on devrait pouvoir utiliser la fonction du modèle (équation 8.19) pour extraire les deux éléments d'information nécessaires (vitesse et direction du vent) en se servant des équations simultanées appropriées. Toutefois, dans la pratique cela n'est pas faisable ; les trois σ^0 s vont comporter une erreur finie de mesure, et la fonction elle-même est fortement non linéaire. En réalité, le modèle, initialement basé sur des données aéronef, peut ne pas s'appliquer à tous les cas. La vitesse et la direction du vent doivent être extraites numériquement, habituellement en minimisant une fonction de la forme suivante :

$$R = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\sigma_i^0 - \sigma^0(U, \phi_i, \theta_i)}{\sigma_i^0 Kp_i} \right]^2 \quad (8.20)$$

où R est effectivement la somme des carrés des résidus, par comparaison des valeurs mesurées de σ^0 à

celles de la fonction du modèle (qui utilise une estimation de la vitesse et de la direction du vent), pondérée par le bruit Kp_i dans chaque faisceau, bruit qui est relié au rapport S/N. L'estimation du vecteur vent est affinée afin de minimiser R . En partant de différentes premières approximations de direction du vent, la solution numérique peut converger jusqu'à quatre vecteurs vents distincts ou ambigus, bien que souvent il n'y en ait que deux qui soient manifestement différents, généralement à 180° l'un de l'autre. L'un de ces deux est la solution « correcte », en ce qu'il est le plus proche de la direction réelle du vent et en déçà des exactitudes de moyenne quadratique exigées de 2 m s^{-1} et 20° . On a développé des algorithmes pour choisir l'ensemble correct de solutions. On utilise aussi des champs de vent du modèle numérique comme premières approximations pour aider à de telles analyses. Des travaux sont actuellement en cours avec les données d'ERS-1 pour étalonner et valider les vents satellite à partir des mesures en surface et à basse altitude par aéronef.

8.3.4.3 Vitesse des vents de surface mesurée par radiomètre à hyperfréquences

L'imageur en hyperfréquence spécialisé (SSM/I) à bord du satellite militaire DMSP fournit des températures de luminance radiométriques hyperfréquentes

ces à plusieurs fréquences (19, 22, 37 et 85,5 GHz) ainsi que les polarisations à la fois verticale et horizontale. On a développé plusieurs algorithmes pour mesurer une variété de paramètres météorologiques. Les vitesses de vent de surface au-dessus de la mer (pas au-dessus du sol) peuvent être mesurées avec une exactitude pouvant atteindre quelques mètres par seconde en se servant d'une équation de régression des températures de luminance dans plusieurs canaux. Des travaux se poursuivent pour vérifier et développer ces algorithmes qui ne sont pas encore utilisés de façon opérationnelle.

8.3.5 Précipitations

8.3.5.1 Techniques dans le visible et l'infrarouge

Les techniques dans le visible et l'infrarouge dérivent des estimations qualitatives ou quantitatives des chutes de pluie à partir des images par satellite à travers des relations indirectes entre le rayonnement solaire réfléchi par les nuages (ou températures de luminance des nuages) et les précipitations. On a développé et testé un certain nombre de méthodes, au cours des 15 dernières années, avec plus ou moins de succès.

Il existe deux approches fondamentales, à savoir les techniques de «cycle d'évolution» et d'«indexation des nuages». Le premier type se sert des données des satellites géostationnaires qui produisent des images habituellement toutes les demi-heures ; on l'a surtout appliquée aux systèmes convectifs. Le deuxième type, également basé sur la classification des nuages, ne nécessite pas une série d'observations consécutives du même système nuageux. Il faut noter toutefois que, jusqu'à maintenant, aucune de ces techniques ne s'est révélée «transportable». Autrement dit, les relations dérivées pour une région et une période de temps données peuvent ne pas être valides pour une région et/ou une saison différente.

D'autres problèmes comprennent les difficultés de définition des limites pluie/sans pluie et l'incapacité de maîtriser la configuration des pluies à mésoscale ou à l'échelle locale. Les scientifiques œuvrant dans ce domaine réalisent ces problèmes et c'est pourquoi il est de pratique courante de parler du calcul des «indices de précipitations» plutôt que de l'intensité des pluies.

8.3.5.2 Méthodes d'indexation des nuages

L'indexation des nuages est la première technique qui a été développée pour évaluer les précipitations depuis l'espace. Elle est basée sur l'hypothèse que la probabilité d'une chute de pluie sur une région donnée est reliée à la quantité et au type de nuages

présents au-dessus de cette région. Donc, on peut admettre que la précipitation peut être caractérisée par la structure de la surface supérieure des nuages correspondants. En outre, dans le cas d'une précipitation de convection, on peut aussi admettre qu'il existe une relation entre la capacité qu'a un nuage cumuliforme de donner de la pluie et ses dimensions à la fois verticale et horizontale. Le développement vertical d'un nuage convectif est relié à la température de luminance de son sommet (les sommets de nuages plus élevés correspondent à des températures de luminance plus froides).

L'approche consiste donc à effectuer une analyse de la structure du nuage (objective ou subjective), basée sur la définition d'un critère reliant la nébulosité à un coefficient (ou indice) de précipitations. Cette caractéristique peut être, par exemple, le nombre de pixels de l'image au-dessus d'un niveau-seuil donné.

L'approche générale pour les méthodes d'indexation des nuages faisant intervenir les observations infrarouges consiste à calculer une relation entre un indice de précipitations (PI) et une fonction de l'aire $S(TBB)$ de la surface nuageuse, associée à la température de luminance de fond (TBB) plus froide qu'une valeur-seuil donnée T_o . Cette relation peut généralement s'exprimer comme suit :

$$PI = A_o + \sum_i A_i S_i(TBB_i) \quad (8.21)$$

pour $TBB_i < T_o$

Si on le désire, on peut inclure, dans le terme droit de l'équation 8.21, un terme additionnel relié à l'image visible.

L'étape suivante consiste à relier PI à une grandeur physique correspondant d'une certaine façon à la pluie. On y parvient en ajustant les coefficients A et le niveau-seuil T_o , par comparaison avec des observations indépendantes, comme les données de pluviomètre ou de radar.

L'un des problèmes inhérents à cette technique est le biais créé par la présence potentielle de nuages non précipitants de l'étage supérieur comme les cirrus. Une autre limitation réside dans le fait que la mesure satellite représente une observation instantanée intégrée spatialement alors que les observations par pluviomètre sont intégrées dans le temps en un lieu donné.

8.3.5.3 Méthodes du cycle d'évolution

Ces méthodes, comme leur nom l'indique, sont basées sur l'observation d'une série d'images consécutives transmises par un satellite géostationnaire.

On a observé que la quantité de précipitation associée à un nuage donné est aussi reliée à son stade de développement. Donc, deux nuages présentant le même aspect (du point de vue des images visibles et infrarouges) peuvent produire différentes quantités de pluie, selon qu'ils sont en voie de développement ou de décroissance.

Comme dans le cas de la technique d'indexation, on calcule une relation entre un PI et une fonction de l'aire S(TBB) de la surface nuageuse, associée à une température de luminance donnée (TBB) supérieure à un niveau-seuil donné. En outre, on tient compte de l'évolution du nuage et on l'exprime en termes de taux de variation de S(TBB) entre deux observations consécutives.

On peut établir une équation, aussi complexe qu'on le souhaite, entre PI et les fonctions de S(TBB) et sa dérivée par rapport au temps :

$$PI = A + A_s S(TBB) + A \frac{d}{dt} S(TBB) \quad (8.22)$$

pour $TBB < T_o$.

Ici aussi, il faut une autre étape pour relier le PI défini par l'équation à une grandeur physique correspondant à la pluie.

De nombreuses relations semblables ont été déjà publiées. Ces publications ont été amplement discutées et on a démontré, dans un cas au moins, que le fait de tenir compte de l'évolution du nuage avec le temps ajoutait une complexité inutile et que l'on pouvait parvenir à un résultat comparable avec une simple technique d'indexation des nuages.

Récemment, on a introduit plus de physique dans les différents schémas. Les améliorations comprennent :

- (a) l'utilisation de modèles de nuages pour tenir compte des précipitations de stratiformes souvent associées aux chutes de pluie de convection et pour aider à classifier les nuages ;
- (b) l'utilisation de la microphysique des nuages, comme les relations taille des gouttes/taux de précipitation ;
- (c) l'introduction d'observations simultanées de la vapeur d'eau dans la troposphère supérieure ;
- (d) l'introduction d'un laps de temps entre les observations satellitaires et les mesures au sol.

Il est devenu évident aussi que les données-satellite pouvaient être utilisées en conjonction avec les observations radar, pas seulement pour valider une méthode, mais en tant qu'outil complémentaire. FRONTIERS (prévision des pluies optimisée à partir de nouvelles techniques radar et satellite interactivement améliorées), développé par le *Meteorologi-*

cal Office du Royaume-Uni, représente un exemple d'utilisation combinée des images par satellite et des observations radar.

On a fait et publié un certain nombre de comparaisons entre différentes méthodes appliquées à des cas tests similaires. Mais on demeure extrêmement prudent quant à la déclaration finale faisant état du succès (ou de l'insuccès) des méthodes dans le visible et l'infrarouge. Le degré de succès est très étroitement lié aux échelles spatio-temporelles envisagées et on ne peut pas s'attendre à ce qu'une régression développée et testée pour une utilisation dans des études climatologiques soit valable aussi pour l'estimation d'une précipitation de méso-échelle. On ne doit pas oublier qu'il est toujours facile d'ajuster des coefficients de régression pour un cas particulier et de prétendre que la méthode a été validée.

8.3.5.4 Techniques hyperfréquences

Les mesures dans le visible et l'infrarouge ne représentent que les observations de la surface supérieure des nuages. Par contraste, on croit souvent que le rayonnement en hyperfréquence n'est pas affecté par la présence des nuages. Cela n'est généralement pas vrai. Son degré de validité varie avec l'hyperfréquence utilisée de même qu'avec le type de nuage en cours d'observation.

Une différence importante entre les rayonnements infrarouge et en hyperfréquence est le fait que tandis que l'émissivité de la surface de l'océan est pratiquement égale à un dans l'infrarouge, sa valeur (quoique variable) est beaucoup plus faible dans le domaine des hyperfréquences (de 5 à 200 GHz dans notre cas). Donc, la température de luminance d'arrière-plan (TBB) de la surface de l'océan semble plus froide dans les hyperfréquences. À terre, l'émissivité est voisine de un, mais elle varie considérablement avec l'humidité du sol.

En ce qui concerne les hyperfréquences, plusieurs effets différents sont associés à la présence de nuages au-dessus de l'océan. Ils dépendent fortement de la fréquence. On est en train de développer des méthodes actives (radar spatioporté) à des fins expérimentales.

8.3.6 Températures de la mer en surface

On peut se servir des mesures par satellite du rayonnement émis par la surface de l'océan pour obtenir des estimations de la température de la mer en surface, en complément des systèmes d'observation *in situ* (par exemple, navires, bouées dérivantes), pour utilisation dans des applications météorologiques ou océanographiques en temps réel ainsi que dans des études climatologiques. Bien que les satellites

mesurent la température d'une couche de l'océan de moins d'environ 1 mm d'épaisseur, les données-satellite se comparent très favorablement aux données conventionnelles. L'énorme avantage des données-satellite est la couverture géographique qui dépasse généralement de loin celle obtenue par des moyens conventionnels. Dans bien des cas aussi, la fréquence des observations satellitaires est meilleure que celle obtenue en utilisant des bouées dérivantes, bien que cela dépende, entre autres, du satellite et de la latitude d'observation.

Les mesures par satellite de la température de la mer en surface sont plus couramment faites à des longueurs d'onde infrarouges et, à un degré moindre, dans les hyperfréquences. On utilise généralement des radiomètres à balayage. Dans l'infrarouge, l'essentiel du traitement consiste à éliminer tous les pixels contaminés par les nuages et à corriger de l'atténuation par la vapeur d'eau les températures de luminance infrarouges mesurées. L'identification des pixels libres de nuages doit être faite avec extrêmement de soin pour s'assurer que les luminances énergétiques de l'océan ne sont pas affectées par les nuages qui, par rapport à la surface de l'océan, rayonnent généralement à des températures beaucoup plus froides. On a développé des algorithmes dans le but spécifique d'éliminer les nuages dans les mesures de température de la mer en surface dans l'infrarouge (par exemple, Saunders et Kriebel, 1988).

Les températures de la mer en surface, par satellite et dans l'infrarouge, ne peuvent être déduites que dans les zones libres de nuages, alors qu'à des longueurs d'onde hyperfréquences l'atténuation par les nuages est de beaucoup plus faible, à tel point que les mesures de données en hyperfréquence sont toujours disponibles sauf dans les situations de forte convection. L'inconvénient avec les données hyperfréquences est que la résolution spatiale de l'instrument est habituellement de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres, alors que dans l'infrarouge elle est généralement de 1 à 5 km environ. Les mesures de température de la mer en surface en hyperfréquence sont traitées par Alishouse et McClain (1985).

8.3.6.1 Techniques infrarouges

La plupart des mesures par satellite sont faites dans la fenêtre atmosphérique de 10,5 à 12,5 µm, pour laquelle les corrections — dues à l'atténuation par la vapeur d'eau — des températures de luminance mesurées peuvent être aussi importantes que 10 K en atmosphère chaude et humide (tropicale). Les techniques d'extraction de la température de la mer en surface abordent généralement ce problème de l'une des deux façons ci-après.

Dans la méthode des différentes longueurs de cheminement (multivisée), les observations sont faites au même endroit de la mer, sous différents angles de visée. Etant donné que l'atténuation atmosphérique est proportionnelle à la longueur de cheminement atmosphérique, on peut utiliser les mesures sous deux angles de visée pour corriger de l'atténuation. Un exemple d'instrument qui utilise cette technique est le radiomètre à balayage dans le sens de la trace au sol (ATSR), une nouvelle génération de radiomètre infrarouge avec double angle de visée de la mer, construit spécialement pour fournir des mesures exactes de température de la mer en surface (Prata et al, 1990). Il est embarqué à bord du satellite de télédétection ERS-1 de l'Agence spatiale européenne, lancé en juillet 1991.

Dans la technique du «split-window» (ou algorithme à fenêtres multiples), les corrections pour l'atténuation atmosphérique sont possibles par suite de l'absorption différentielle dans une région fenêtre donnée de l'atmosphère (par exemple, 10,5 à 12,5 µm) et de la nature de l'absorption de la vapeur d'eau hautement dépendante de la longueur d'onde. Les températures de luminance infrarouges différentes, mesurées à deux longueurs d'onde quelconques à l'intérieur de la fenêtre infrarouge de 10 à 12 µm, confirment les études théoriques qui indiquent une relation fortement linéaire entre toute paire de températures infrarouges et la correction nécessaire. Donc, la différence d'atténuation atmosphérique dans une paire de longueurs d'onde est proportionnelle à la différence d'atténuation dans une seconde paire. Une fenêtre est choisie en tant que fenêtre parfaite (par laquelle le satellite «voit» la surface de l'océan) et une longueur d'onde est commune aux deux paires. Un algorithme typique de «split-window» a la forme suivante :

$$T_s = a_0 + T_{11} + a_1 (T_{11} - T_{12}) \quad (8.23)$$

où T_s est la température de la mer en surface ; les valeurs de T sont les températures de luminance à 11 et 12 µm, telles qu'indiquées ; a_0 et a_1 sont des constantes. Les algorithmes de cette forme générale ont été mis au point pour être utilisés avec les mesures diurnes ou nocturnes et en se servant de plusieurs canaux infrarouges (par exemple, MacClain, Pichel et Walton, 1985).

• Instruments

On a utilisé un certain nombre d'instruments spatioportés pour les mesures de température de la mer en surface (Rao et al, 1990) :

- (a) AVHRR sur les satellites NOAA ;
- (b) VAS sur les satellites GOES ;
- (c) HIRS/MSU sur les satellites NOAA ;
- (d) VISSR sur les satellites GMS ;

- (e) SMMR (radiomètre en hyperfréquence à balayage multibande) sur Seasat et Nimbus-7 ;
- (f) SSM/T (capteur en hyperfréquence spécialisé/ température) sur DMSP.

L'AVHRR a été de loin la source de mesure de la température de la mer en surface par satellite la plus largement utilisée sur ses canaux 3, 4 et 5 (Annexe 8.A).

8.3.6.2 Comparaison avec les observations au sol

Avant d'examiner la comparaison entre les mesures de température de la mer en surface obtenues par satellite et les mesures *in situ*, il est important de comprendre ce que les instruments embarqués mesurent réellement. Entre 3 et 14 μm , les radiomètres spatioportés ne mesurent que le rayonnement émis par une couche «de peau» d'environ 1 mm d'épaisseur. La température physique réelle de cette couche superficielle peut différer de plusieurs K de celle de la mer en dessous (d'une profondeur de quelques mètres à quelques dizaines de mètres), selon les conditions existantes et un certain nombre de facteurs comme :

- (a) le mélange des couches supérieures de l'océan dû au vent, ou l'affaissement gravitationnel la nuit, après que les couches les plus élevées se soient refroidies par effet radiatif ;
- (b) le réchauffement de la surface de l'océan par la lumière solaire ;
- (c) l'évaporation ;
- (d) la pluie ;
- (e) les courants ;
- (f) l'upwelling et le downwelling.

Le plus sérieux de ces problèmes peut être le réchauffement de la couche supérieure de l'océan par une journée calme et ensoleillée. La disparité entre les températures de la mer en surface par satellite est contournée jusqu'à un certain point en utilisant des algorithmes diurnes et nocturnes qui ont été spécialement affinés pour tenir compte des effets océaniques diurnes. Alternativement, on préfère souvent les températures nocturnes de la mer en surface par satellite parce que l'effet de peau et la thermocline océanique sont à un minimum la nuit. Il faut aussi se rappeler que les mesures faites sur un navire se réfèrent à une valeur ponctuelle à une profondeur donnée («température de prise») de 10 m ou plus, alors que le satellite mesure la luminance énergétique moyennée sur une large surface (de une à plusieurs dizaines, voire centaines de km^2). Notons que les données de navire peuvent souvent être d'une qualité très variable.

Rao et al. (1990) montrent une comparaison entre les températures de la mer en surface obtenues par

satellite à canaux multiples à l'échelle du globe et les températures fournies par les bouées dérivantes. Ce biais est très petit et l'écart quadratique moyen est de 0,5 K environ. Des comparaisons typiques entre des températures de la mer en surface par satellite en infrarouge et des données *in situ* (par exemple, de bouées) montrent des biais en deçà de 0,1 K et des erreurs dans la plage de 0,4 à 0,6 K.

Rao et al. (1990) montrent aussi une comparaison entre les températures de la mer en surface par satellite en hyperfréquence (avec l'instrument SMMR) et des observations de navire. Le biais est de 0,22 K et l'écart type est de 0,75 K sur une période de un mois.

En résumé, les températures de la mer en surface obtenues par satellite sont une source importante d'observations à utiliser dans les applications météorologiques et océanographiques. Etant donné que les instruments spatioportés fournissent des mesures de température de la mer nettement différentes de celles des navires ou des bouées, il faut faire attention quand on fusionne les données-satellite et des données conventionnelles. Toutefois, nombre de ces problèmes éventuels de fusionnement de jeux de données légèrement disparates ont été résolus en affinant soigneusement des algorithmes de température de la mer en surface par satellite, afin de s'assurer que les données-satellite sont cohérentes par rapport à un point de référence défini par des observations de bouées dérivantes.

8.3.7 Taux d'humidité de la haute troposphère

La méthode utilisée pour extraire les valeurs de taux d'humidité de la haute troposphère (à partir de données de satellite géostationnaire) est basée sur l'interprétation des luminances énergétiques du canal vapeur d'eau 6,7 μm et les résultats représentent une valeur moyenne à travers une couche épaisse de l'atmosphère, entre 600 et 300 hPa approximativement. Les limites de cette colonne atmosphérique ne peuvent pas être spécifiées avec précision, car la fonction de contribution du canal vapeur d'eau varie proportionnellement en altitude avec la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère. L'information de sortie du traitement de segment fournit une description de toutes les surfaces identifiées (nuage, sol ou mer) et le produit de taux d'humidité de la haute troposphère n'est extrait que pour les segments qui ne contiennent pas de nuages moyens et élevés. La résolution horizontale est celle du segment nominal et les valeurs sont exprimées en pourcentage d'humidité relative.

Le produit est extrait deux fois par jour à partir de Météosat (basé sur des données-image à 1100 et 2300 UTC) et diffusé sur le SMT en code SATOB de l'OMM.

8.3.8 Ozone total

La lumière ultraviolette solaire frappant l'atmosphère est partiellement absorbée et partiellement rétrodiffusée vers l'espace. Etant donné que l'ozone est le principal rétro-diffuseur, le détecteur de rayonnements solaires rétrodiffusés (SBUV), qui mesure le rayonnement ultraviolet rétrodiffusé, permet de calculer la répartition mondiale et la variation temporelle de l'ozone atmosphérique. Les mesures dans la bande de l'ultraviolet, de 160 à 400 µm, sont maintenant d'un grand intérêt en tant qu'indicateur de changements climatiques éventuels.

En plus du SBUV, le spectromètre imageur d'ozone total (TOMS), embarqué sur Nimbus-7, est un instrument monochrome mesurant le rayonnement dans six bandes de 0,28 à 0,3125 µm. Pendant une décennie, il a fourni des estimations d'ozone total en deçà de 2 pour cent des données au sol et il a été l'une des principales sources de données dans la surveillance du «trou d'ozone».

Plutôt qu'une mesure dans les longueurs d'onde de l'ultraviolet ou du visible, une bande d'absorption de l'ozone de 9,7 µm dans l'infrarouge thermique a permis la mesure de la densité de la colonne d'ozone total, en utilisant des radiomètres spatioportés avec soit balayage en mode limbe, soit balayage sous-satellite (par exemple, l'instrumentation TOVS à bord des satellites NOAA comprend un canal 9,7 µm). L'exactitude de ce type de mesure par satellite comparée aux données au sol (par exemple, avec le spectrophotomètre Dobson) est de 10 pour cent environ, essentiellement parce qu'elle dépend d'un seul canal (voir Ma, Smith et Woolf, 1984).

Il faudrait noter que l'énorme avantage des données-satellite par rapport aux données au sol (sondes ozone ou mesures Dobson) est la couverture temporelle et la large couverture spatiale qui rendent ces données extrêmement importantes pour la surveillance mondiale de l'appauvrissement de l'ozone, spécialement au-dessus des régions polaires où les réseaux d'observation conventionnels sont très clairsemés.

Les années 1990 voient la mise en service d'instruments embarqués plus spécialisés, qui mesurent les niveaux de l'ozone ou d'autres composants connexes de la haute atmosphère. Cela comprend plusieurs instruments à bord du satellite de recherche en haute atmosphère (UARS) de la NASA ; l'instrument de mesure de l'ozone et des aérosols polaires (POAM

II) à bord de Spot-3, satellite de télédétection lancé en 1993 ; l'expérience III sur les aérosols et les composants gazeux mineurs de la stratosphère (SAGE III) ; enfin une gamme d'instruments prévus pour embarquer sur les orbiteurs polaires du système d'observation de la Terre (EOS) vers la fin des années 1990.

8.3.9 Détection des cendres volcaniques

Les nuages de cendre volcanique constituent un grave danger pour l'aviation. Depuis 1970 seulement, il y a eu un grand nombre d'incidents dangereux et coûteux concernant des avions à réaction volant par inadvertance dans des nuages de cendre provenant de l'éruption de volcans, surtout dans la région Asie-Pacifique et dans les pays riverains du Pacifique où de nombreux volcans sont en activité. Suite à ce problème, l'OMM, l'Organisation de l'aviation civile internationale et d'autres organisations ont travaillé activement à la création de systèmes et de procédures améliorées de détection et d'avertissement, afin de minimiser les risques pour les passagers et les avions.

La distinction entre les nuages de cendre volcanique et les nuages normaux (eau/glace) à partir des images par satellite, sur un seul canal dans l'infrarouge ou le visible, est souvent extrêmement difficile, sinon impossible, essentiellement parce que les nuages de cendre apparaissent souvent dans des régions où l'activité nuageuse et orageuse est fréquente, et parce que les deux types de nuages sont semblables. Toutefois, de nouvelles techniques ont été développées afin d'utiliser le canal «split window» de l'instrument AVHRR du satellite NOAA pour aider à la distinction entre les nuages de cendre et les nuages normaux et aussi pour améliorer la délimitation des nuages de cendre qui peuvent ne pas être visibles sur des images infrarouges à canal unique.

La technique faisant appel à l'AVHRR dépend du fait que les propriétés microphysiques des nuages de cendre diffèrent de celles des nuages eau/glace dans l'infrarouge thermique, de telle manière qu'au-dessus d'un nuage de cendre, la différence T4-T5 entre les températures de luminance des canaux 4 et 5 de l'instrument AVHRR est généralement négative et va jusqu'à -10 K alors que, pour les nuages eau/glace, T4-T5 est voisine de zéro, ou petite et positive (Prata, 1989 et Potts, 1993).

Ce principe de détection des nuages de cendre volcanique est actuellement appliqué dans le développement de radiomètres multicanaux utilisés au sol ou aéroportés.

On a fait très peu d'études à partir d'observations in situ de nuages de cendre volcanique dans le but

de confirmer la qualité et l'exactitude de la discrimination de ce type de nuages en se servant de l'AVHRR. On tend à utiliser les rapports «au sol» sur les éruptions volcaniques à des fins opérationnelles pour signaler aux météorologues que les images par satellite peuvent alors être utilisées pour surveiller l'évolution et le déplacement subséquents des nuages de cendre. Il faudrait noter que cette technique a ses limites, par exemple dans le cas où le nuage de cendre peut être dispersé et le rayonnement sous-jacent des nuages eau/glace ou des surfaces mer/sol se traduire par des valeurs T4-T5 voisines de zéro ou positives, plutôt que négatives comme on s'y attendrait au-dessus d'un nuage de cendre volcanique.

8.3.10 Indice différentiel normalisé de végétation

Les observations par satellite peuvent servir à identifier et surveiller la végétation (Rao et al, 1990). Les applications comprennent la surveillance des cultures, la surveillance du déboisement, la gestion forestière, l'évaluation de la sécheresse et la surveillance des inondations. Cette technique dépend du fait que la réflectance de la végétation riche est faible aux longueurs d'onde du visible mais très forte dans la plage s'étendant d'environ 0,7 à 1,3 µm (par suite de l'interaction du rayonnement incident avec la chlorophylle). Toutefois, la réflectance de surfaces telles que le sol et l'eau demeurent faibles dans les domaines du proche infrarouge et du visible. Donc, les techniques d'évaluation de la végétation par satellite se servent généralement de la différence de réflectivité, entre un canal dans le visible et un canal dans le proche infrarouge, d'environ 1 µm.

A titre d'exemple, l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI) obtenu à partir des données AVHRR, qui est largement utilisé, se définit comme suit :

$$\text{NDVI} = (\text{Ch2} - \text{Ch1}) / (\text{Ch2} + \text{Ch1}) \quad (8.24)$$

Les valeurs de cet indice se situent généralement dans la plage de 0,1 à 0,6 µm pour la végétation, les plus élevées étant associées au plus fort verdissement et/ou à la plus forte densité de couverture végétale. Par contraste, le NDVI pour les nuages, la neige, l'eau ou les roches est soit très proche de zéro, soit négatif.

La surveillance de la végétation par satellite a été utilisée pour la première fois à grande échelle vers le milieu des années 70. Depuis, elle a été perfectionnée, principalement en résultat d'une amélioration graduelle de la compréhension théorique de l'in-

raction complexe entre la végétation et le rayonnement incident, et aussi d'une meilleure connaissance des caractéristiques de l'instrument embarqué et des corrections à apporter aux mesures par satellite. Le traitement des données-satellite pour les NDVI, tout comme les mesures de température de la mer en surface par satellite, fait intervenir de nombreuses corrections - pour la géométrie de visée «satellite et éclairement solaire», les effets atmosphériques comme les aérosols et la vapeur d'eau, les caractéristiques d'étalonnage de l'instrument, etc. Dès le début, on procède également à l'élimination des nuages pour obtenir des pixels exempts de nuages.

Les trois principaux instruments utilisés pour la surveillance de la végétation par satellite sont l'AVHRR du satellite NOAA, ainsi que le scanner multibande et l'instrument de cartographie thématique de Landsat.

L'interprétation des NDVI et leur application à différents secteurs de la météorologie ou à la science du système terrestre repose sur une compréhension de ce que le satellite mesure exactement, ce qui est un problème complexe. En effet, dans le champ de vision, les feuilles vertes peuvent être orientées sous différents angles ; il peut y avoir différents types de végétation ; et il peut y avoir des parties du champ de vision sans végétation. Néanmoins, le NDVI est corrélé avec les paramètres mesurés au sol, comme l'indique la figure 8.15 (Paltridge et Barber, 1988), qui montre un NDVI (appelé V_o) porté en regard de la teneur en humidité de combustibles provenant d'échantillons de végétation pris au sol en différents endroits vus par l'instrument AVHRR du satellite NOAA. La courbe montre que le NDVI est bien corrélé avec la teneur en humidité des combustibles, sauf au-delà d'une valeur critique de cette teneur pour laquelle la végétation est très verte et pour laquelle le NDVI demeure à un niveau constant. Donc, les NDVI peuvent être très utiles pour la prévision des conditions propices aux incendies.

La figure 8.16 (Malingreau, 1986) montre l'évolution du NDVI sur une période de trois ans, en (a) pour une région de rizières en Thaïlande et en (b) pour un système de culture mixte blé-riz en Chine. Les pics du NDVI correspondent aux cultures de riz en saison sèche et en saison humide dans le graphique (a) et aux cultures de blé et de riz dans le graphique (b), respectivement.

8.3.11 Autres paramètres

À partir des satellites, on procède actuellement à l'évaluation d'un certain nombre d'autres paramètres comprenant différents gaz atmosphériques

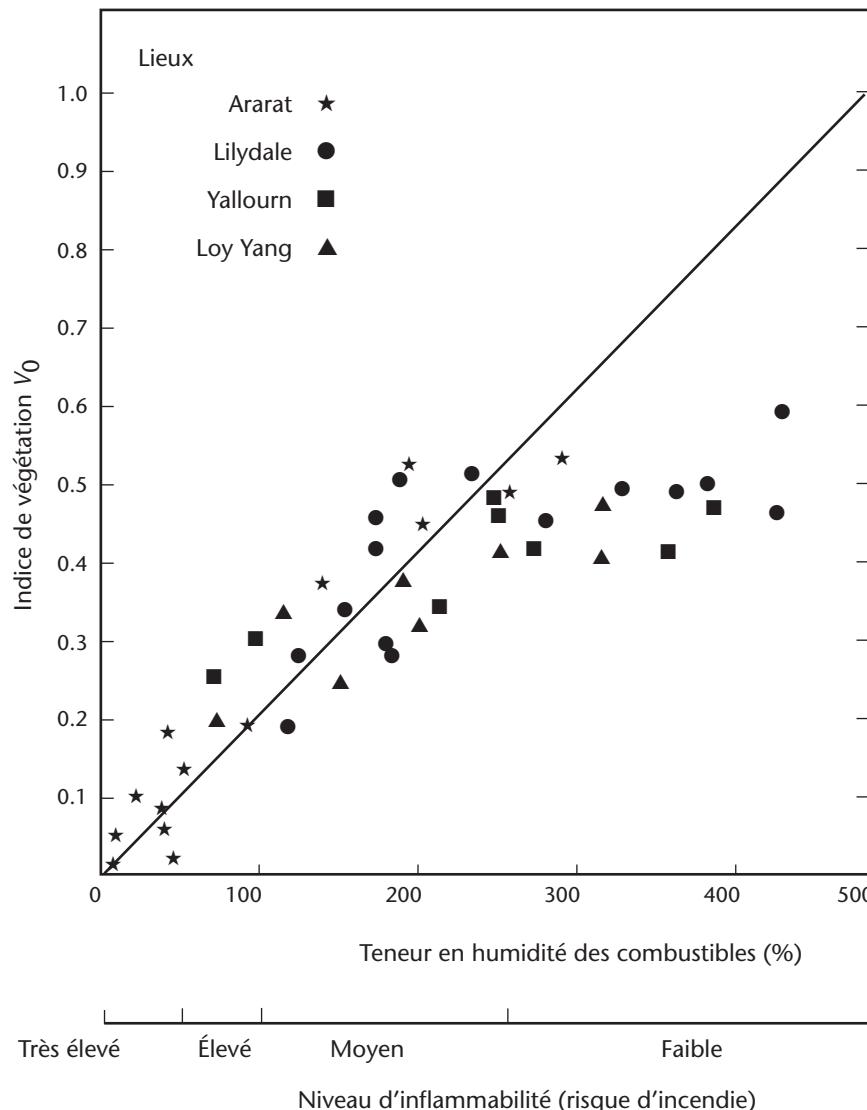


Figure 8.15. Indice de couverture totale de végétation observé par satellite en tant que fonction de la teneur en humidité des combustibles. Chaque point représente la moyenne en un lieu particulier, à un moment d'échantillonnage particulier (voir texte).

à l'état de trace, l'humidité du sol (provenant des données du radar à synthèse d'ouverture (ERS-1)), la vapeur d'eau intégrée (SSM/I), l'eau à l'état liquide dans les nuages (SSM/I), la répartition des eaux de crues et l'expérience sur le bilan radiatif de la Terre (ERBE) (à bord des orbiteurs polaires de la NOAA). La pression atmosphérique n'a pas encore été mesurée de façon fiable depuis l'espace. L'instabilité atmosphérique peut être mesurée à partir des profils de la température et de l'humidité.

La surveillance des feux de brousse s'est très bien déroulée à l'aide d'instruments embarqués, notamment l'AVHRR sur les satellites NOAA (Robinson, 1991). Le canal 3 (fenêtre 3,7 µm) est extrêmement sensible à la présence de «points chauds», c'est-à-

dire de régions dans lesquelles la température de luminance peut aller de 400 à environ 1000 K. Il est sensible à cause de la forte sensibilité thermique de la fonction de Planck et aussi du maximum de luminance énergétique du corps noir à partir d'objets chauds à environ 4 µm. Les points chauds apparaissent de façon extrêmement évidente sur les images du canal 3, ce qui permet de détecter avec exactitude les fronts d'un feu. Les images du canal 3, combinées à celles des canaux 1 et 4, utilisées respectivement pour l'identification de la fumée et des nuages, sont très utiles dans la détection des incendies.

On peut détecter la neige et la glace avec des instruments comme l'AVHRR (dans le visible et l'infrarou-

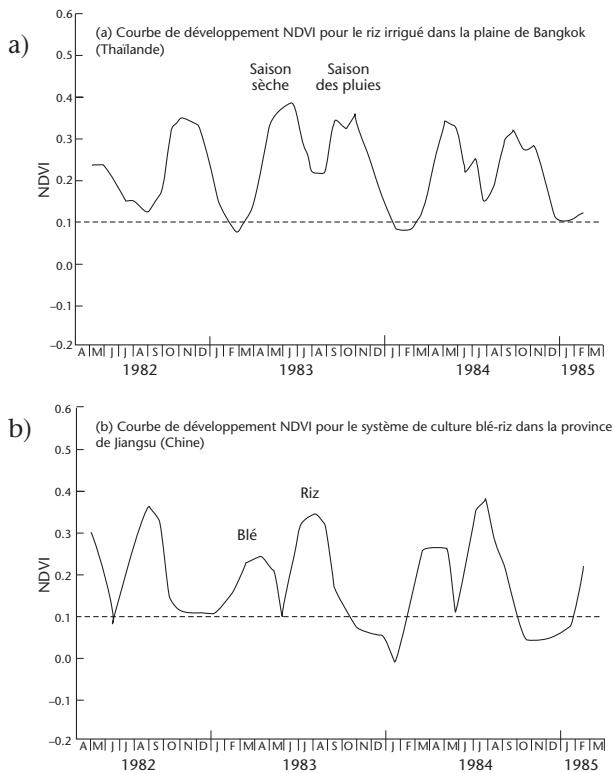


Figure 8.16. Courbe de développement NDVI pour le riz irrigué dans la plaine de Bangkok en Thaïlande et le blé-riz en Chine.

ge) ou le SMMR (hyperfréquences) à bord de Nimbus-7 (Gesell, 1989). Avec l'AVHRR, le processus de détection fait intervenir la discrimination entre neige/glace et différentes surfaces comme le sol, la mer ou les nuages. La variation, selon la longueur d'onde, des caractéristiques spectrales de ces surfaces est exploitée en se servant d'algorithmes englobant des techniques comme les seuils ; les taux de luminance énergétique ou de réflectivité à différentes longueurs d'onde ; les différences entre les lumières énergétiques ou les réflectivités ; ou enfin la cohérence spatiale. L'inconvénient d'utiliser l'AVHRR est que la détection est limitée par la présence de nuages, ce qui est important parce que la nébulosité risque d'être très élevée dans les régions d'intérêt.

Aux longueurs d'onde hyperfréquences, la détection de la glace de mer repose sur le fort contraste entre la mer et la glace, par suite des émissivités (et donc des températures de luminance) largement différentes de ces surfaces, à ces longueurs d'onde. Le principal avantage de la détection en hyperfréquence est la capacité tout temps, bien que la résolution spatiale soit généralement de plusieurs dizaines de kilomètres au lieu de 1 km pour l'AVHRR.

8.4

INSTALLATIONS ET MOYENS CONNEXES

8.4.1 Télémesure par satellite

Tous les satellites reçoivent des instructions et transmettent des données par l'intermédiaire d'équipements de télémesure. Toutefois, tous les satellites météorologiques en orbite géostationnaire, et quelques-uns en orbite polaire, ont à leur bord des transpondeurs qui reçoivent des données qui leur sont transmises à distance à partir de plates-formes de collecte de données (PCD) installées dans les stations périphériques. Ces équipements permettent aux satellites d'agir en tant que stations de relais de télémesure.

Les avantages offerts par la télémesure par satellite sont les suivants :

- (a) il n'y a pas besoin de stations-relais ;
- (b) l'installation des stations périphériques et des récepteurs est simple ;
- (c) les stations périphériques peuvent être aisément déplacées d'un site à un autre ;
- (d) les stations périphériques sont discrètes ; leurs antennes sont petites et n'exigent pas de hauts mât ;
- (e) il y a peu de limitation par la topographie ;
- (f) un récepteur peut recevoir des données de stations périphériques couvrant plus d'un quart de la surface terrestre ;
- (g) les besoins en énergie étant minimes, l'alimentation solaire est suffisante ;
- (h) la fiabilité de l'équipement est élevée, à la fois à bord du satellite et sur le terrain ;
- (i) l'utilisateur n'a besoin d'aucune licence de fréquence, l'exploitant de satellite étant licencié ;
- (j) on peut exploiter autant de récepteurs que nécessaire, sans avoir besoin d'augmenter l'énergie ou les équipements dans les stations périphériques.

8.4.2

Le système de télémesure par plate-forme de collecte de données de MÉTÉOSAT

La figure 8.17 montre le système de télémesure par PCD de MÉTÉOSAT. Il convient de noter que des systèmes similaires équipent les satellites GOES, GMS et INSAT, ils sont décrits dans une publication de l'OMM (1989). Les systèmes pour d'autres satellites géostationnaires sont semblables. La station périphérique (A) transmet ses mesures à MÉTÉOSAT (B), suivant le trajet 1, à des intervalles de temps déterminés (une heure, trois heures, vingt-quatre heures, etc.). Elle dispose d'un créneau de 1 min pendant lequel elle doit transmettre ses données, sur une fréquence comprise entre 402,01

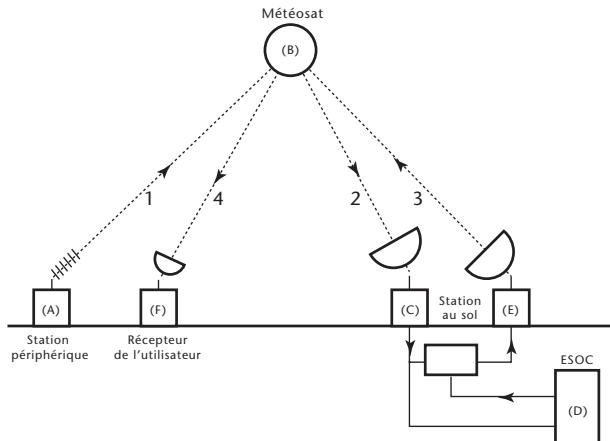


Figure 8.17.
Le système de télémesure par PCD de MÉTÉOSAT

et 402,20 MHz avec une puissance de 5 W (25 à 40 watts pour les stations périphériques mobiles avec antennes omnidirectionnelles).

Le satellite retransmet immédiatement ces données à la station au sol (C) du Centre européen d'opérations spatiales, situé dans l'Odenwald près de Michelstadt, Allemagne, suivant le trajet 2, sur une fréquence de 1 675 MHz environ. De là les données sont envoyées par ligne terrestre au Centre européen d'opérations spatiales, à quelques 40 km au nord-ouest de l'Odenwald, à Darmstadt (D). C'est là qu'elles subissent un contrôle de qualité, qu'elles sont archivées et, s'il y a lieu, diffusées sur le réseau mondial de télécommunications. Elles sont également conservées à la station au sol et renvoyées à MÉTÉOSAT (multiplexées avec les données d'imagerie) par une seconde antenne parabolique (E), suivant le trajet 3, pour retransmission aux utilisateurs via le satellite, suivant le trajet 4.

Le signal a un niveau tel qu'il peut être reçu par une antenne parabolique de 2 m de diamètre, bien que 1,5 m suffit souvent. La parabole abrite un «down convertisseur de signaux» dont le but est d'abaisser le signal reçu de 1 694,5 à 137 MHz pour l'appliquer à l'entrée d'un récepteur, qui décode les transmissions, délivrant en sortie les données en caractères ASCII sur une imprimante ou un ordinateur personnel.

L'unité qui constitue le cœur d'une station périphérique est la PCD. C'est un ensemble électronique, semblable en bien des points à un enregistreur automatique, qui peut accepter soit plusieurs tensions d'entrée analogiques directement des capteurs, soit des données série (RS232) d'une unité de traitement entre les capteurs et la PCD. Il contient aussi une petite mémoire pour stocker les lectures

faites entre les transmissions, un module de traitement pour la gestion globale, un circuit d'horloge, l'émetteur radio et une antenne soit directionnelle soit multidirectionnelle.

La mémoire peut stocker jusqu'à 600 octets pour une transmission à 100 bits par seconde. Cette capacité peut être doublée, mais cela nécessite deux créneaux de temps de 1 min pour la transmission. La capacité est déterminée par la quantité de données qui peuvent être transmises dans un créneau de temps de 1 min.

Les PCD sont programmées en usine avec leur adresse (un nombre octal de 8 chiffres) et leur heure de transmission, les deux étant spécifiées par Eumetsat. Il est vraisemblable que l'utilisateur pourra programmer les futures PCD, pour permettre une plus grande souplesse.

En exploitation, l'horloge interne est calée sur l'heure UTC par un opérateur. Cela se fait soit avec un «synchroniseur», soit avec un ordinateur personnel portable. On tolère de toute façon une dérive jusqu'à 15 secondes ; après quoi l'horloge doit être réinitialisée.

Aux heures convenues, la PCD transmet le contenu accumulé de sa mémoire à MÉTÉOSAT et ensuite la vide pour être prête à recevoir le prochain jeu de données afin de le transmettre lors du prochain créneau de temps. Cette opération est répétée indéfiniment.

On peut aussi utiliser le synchroniseur (ou l'ordinateur personnel) pour donner un nom à la station (par exemple son emplacement) et effectuer toute une gamme de tests qui comprend la vérification de ce qui suit : calage de l'horloge, tension de la batterie, état de l'émetteur, entrées analogiques et contenu de la mémoire. Il est également possible d'accélérer l'horloge pour tester le fonctionnement d'ensemble, y compris faire un test de transmission (le chargement de la mémoire étant fictif pour prévenir toute interférence en transmettant en dehors du créneau de temps alloué).

Une PCD se loge dans un petit boîtier et peut être alimentée par une batterie à énergie solaire. Le reste de la station périphérique comprend les capteurs qui sont semblables à ceux d'une station d'enregistrement conventionnelle ou d'un équipement de radiotélémesure au sol.

8.4.3 Traitement des données MÉTÉOSAT

- **Images**

Les images sont construites, ligne par ligne, par un radiomètre multispectral (voir les sections précédentes).

MÉTÉOSAT tourne autour de son axe à 100 tours par minute, balayant la Terre suivant des lignes horizontales, d'est en ouest. Un miroir effectue un petit déplacement du sud au nord à chaque rotation, achevant un balayage complet de la Terre en 25 minutes (non compris les 5 minutes nécessaires pour remettre en place le miroir en vue du prochain balayage).

L'image visible est formée de 5 000 lignes, chacune de 5 000 pixels, ce qui donne une résolution de 2,5 km immédiatement au-dessous du satellite (la résolution est moindre aux latitudes élevées). Les deux images infrarouges comprennent chacune 2 500 lignes de 2 500 pixels, ce qui donne une résolution sous-satellite de 5 km.

Les images sont transmises numériquement, ligne par ligne, à 333 000 bits par seconde, pendant le temps que le scanner regarde l'espace. Ces transmissions ne sont pas faites à l'intention de l'utilisateur final, mais elles vont directement à la station au sol, où elles sont traitées par le Centre européen d'opérations spatiales et ensuite renvoyées aux utilisateurs, via MÉTÉOSAT, sur deux canaux distincts.

Le premier canal est réservé aux données d'image numérique de haute qualité, pour réception par une station utilisatrice principale (PDUS). Le second canal effectue la transmission d'images sous forme analogique, appelée transmission de cartes météorologiques en fac-similé (WEFAX), qui est la norme pour la plupart des satellites météorologiques (y compris les orbiteurs polaires). Ces dernières images peuvent être reçues par les stations utilisatrices secondaires (SDUS).

Les stations utilisatrices secondaires (SDUS) reçoivent des images couvrant différentes parties de la surface terrestre se trouvant dans le champ de vision de MÉTÉOSAT. Les transmissions se font selon un horaire journalier, avec transmission d'une image toutes les 4 minutes. Ces stations reçoivent aussi les transmissions des PCD.

• Traitement des données PCD

En plus d'acquérir et de diffuser les images, MÉTÉOSAT dispose aussi actuellement de 66 canaux pour relayer les données PCD depuis les stations périphériques jusqu'à la station au sol. La moitié de ces canaux est réservée à l'usage international, c'est-à-dire pour les PCD mobiles passant du champ de vision d'un satellite météorologique géostationnaire dans celui du suivant. Le reste est pour les PCD «régionales» fixes. Chaque canal peut prendre en charge autant de PCD que sa fréquence de transmission et leur longueur de

rapport le permettent. Donc, avec des émissions trihoraires et des messages de 1 min de toutes les PCD, et avec une période tampon de 30 sec entre chaque (pour tenir compte de la dérive d'horloge), chaque canal peut prendre en charge 120 PCD, ce qui donne un total de 7 920.

8.4.4 Systèmes de télémesure des satellites en orbite polaire

Les satellites polaires tournent sur orbites basses orientées nord-sud, avec une période de 100 minutes environ. Par conséquent, ils n'apparaissent pas stationnaires en un point du ciel. Au lieu de cela, ils apparaissent au-dessus de l'horizon, traversent le ciel (pas forcément directement au-dessus) et disparaissent à l'horizon opposé. Ils sont visibles pendant 10 minutes environ à chaque passage, mais cela varie avec l'angle sous lequel ils sont visibles.

De telles orbites imposent un mode d'opération différent pour qu'un système de télémesure puisse les utiliser. A l'inverse des systèmes géostationnaires, les PCD servant des satellites à orbite polaire (appelés systèmes de collecte de données - DCS) ne peuvent transmettre à des heures fixes, de même que leurs antennes ne peuvent être dirigées vers un seul point du ciel. Au lieu de cela, les DCS sont réglés pour transmettre à des intervalles de temps donnés, allant de 100 à 200 secondes. Ils émettent sur une fréquence similaire, mais non identique, à celle des PCD, et leurs antennes sont, forcément, omnidirectionnelles.

On affecte un intervalle de temps de transmission légèrement différent à chaque station périphérique, de façon à réduire les risques d'avoir deux stations qui transmettent simultanément. On obtient une nouvelle séparation des stations périphériques par le fait que, vu le déplacement du satellite, il se produit un décalage Doppler sur la fréquence de réception. Cela diffère pour chaque DCS parce qu'il occupe un emplacement différent par rapport au satellite.

On se sert aussi de cette dernière caractéristique pour pouvoir suivre la position des stations périphériques mobiles. C'est l'une des caractéristiques utiles des orbites polaires permettant, par exemple, de suivre une bouée dérivante tout en recueillant ses données. En outre, la bouée peut se déplacer tout autour de la Terre en étant toujours suivie par le même satellite. C'est le principe de base du système Argos qui fonctionne sur les satellites NOAA et qui est géré par la France. Même les DCS fixes peuvent bénéficier de cette caractéristique, en cela qu'elle permet de recueillir des données de n'importe quel point de la Terre par l'intermédiaire du satellite en question.

Les transmissions des DCS sont reçues par le satellite en un point donné lors de son survol. Les moyens de transfert des données reçues à l'utilisateur doivent être différents de ceux adoptés par MÉTÉOSAT. Cela se fait de deux façons.

Dans la première, les données reçues sont immédiatement retransmises, en temps réel, dans la bande des Ultra hautes fréquences, et elles peuvent être reçues par le récepteur d'un utilisateur équipé d'une antenne omnidirectionnelle. Pour assurer la communication, le récepteur et la station périphérique doivent se trouver à moins de 2 000 km environ l'un de l'autre, puisque les deux doivent pouvoir voir le satellite au même moment.

Dans la seconde, les données reçues sont sauvegardées sur un enregistreur à bande magnétique à bord du vaisseau spatial, puis retransmises aux stations au sol lorsque le satellite les survole. Ces stations se trouvent aux Etats-Unis d'Amérique et en France (système Argos). De là, les données sont diffusées sur

le SMT ou bien imprimées et envoyées par la poste si l'urgence est moindre.

Le coût d'utilisation des satellites polaires n'est pas faible et, alors qu'ils présentent quelques avantages uniques par rapport aux systèmes géostationnaires, leur emploi général comme satellites de télémétrie est moindre. Leur plus grande valeur vient du fait qu'ils peuvent recueillir des données aux haute latitudes que les satellites géostationnaires ne peuvent atteindre.

Ils peuvent aussi avoir de la valeur dans celles des régions du monde qui ne sont pas actuellement couvertes par les satellites géostationnaires. Par exemple, le satellite GMS japonais ne dispose pas actuellement de moyens de retransmission et les utilisateurs ne peuvent recevoir les données que via le SMT. Tant que la surface terrestre ne sera pas entièrement couverte par des satellites géostationnaires équipés de moyens de retransmission, les satellites à orbite polaire combleront utilement le manque.

ANNEXE 8.A**CANAUX DU RADIOMÈTRE PERFECTIONNÉ À TRÈS HAUTE RÉSOLUTION***Résolution au nadir 1,1 km : largeur de fauchée > 2 600 km*

<i>Canal</i>	<i>Longueur d'onde μm</i>	<i>Utilisations principales</i>
1	0,58-0,68	Cartographie diurne de la surface des nuages
2	0,725-1,10	Eaux de surface, glace, fonte de la neige
3	3,55-3,93	Température de la mer en surface, cartographie nocturne des nuages
4	10,30-11,30	Température de la mer en surface, cartographie diurne et nocturne des nuages
5	11,50-12,50	Température de la mer en surface, cartographie diurne et nocturne des nuages

ANNEXE 8.B

CANAUX HIRS ET LEURS APPLICATIONS

**Les canaux du Sondeur en infrarouge à grand pouvoir séparateur du Sondeur vertical opérationnel
du Satellite d'observation télévisuelle à infrarouge**

<i>Canal</i>	<i>Longueur d'onde centrale μm</i>	<i>Utilisations principales</i>
1	15,00	Sondage de la température
2	14,70	
3	14,50	
4	14,20	
5	14,00	
6	13,70	
7	13,40	
8	11,10	Température en surface et détection des nuages
9	9,70	Ozone total
10	8,30	Sondage de la vapeur d'eau
11	7,30	
12	6,70	
13	4,57	Sondage de la température
14	4,52	
15	4,46	
16	4,40	
17	4,24	
18	4,00	Température en surface
19	3,70	
20	0,70	Détection des nuages

Canaux du sondeur à hyperfréquences

<i>Canal</i>	<i>Fréquence centrale GHz</i>	<i>Utilisations principales</i>
1	50,31	Émissivité de la surface et atténuation des nuages
2	53,73	Sondage de la température
3	54,96	
4	57,95	

Canaux du sondeur stratosphérique

Trois canaux 15 μm pour le sondage de la température.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Alishouse, J.C. and E.P. McClain : Sea surface temperature determinations. *Advances in Geophysics*, 27, pp. 279-296.
- Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, 1991 : *Technical Proceedings of the Sixth International TOVS Study Conference*. University of Wisconsin. (Voir également les procès-verbaux des conférences précédentes, 1989, 1988).
- Eyre, J.R., J.L. Brownscombe and R.J. Allam, 1984 : Detection of fog at night using advanced very high resolution radiometer imagery. *Meteorological Magazine*, 113, pp. 266-271.
- Gesell, G., 1989 : An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 10, pp. 897-905.
- King-Hele, D., 1964 : *Theory of Satellite Orbits in an Atmosphere*. Butterworths, London.
- Ma, X.L., W.L. Smith and H.M. Woolf, 1984 : Total ozone from NOAA satellites : A physical model for obtaining measurements with high spatial resolution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, pp. 1309-1314.
- Malingreau, J.P., 1986 : Global vegetation dynamics : Satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1121-1146.
- Massey, H., 1964 : *Space Physics*. Cambridge University Press, London.
- Mc Clain, E.P., W.G. Pichel, and C.C. Walton, 1985 : Comparative performance of AVHRR-based multi-channel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90, pp. 11587-11601.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1989 : *Guide du Système Mondial d'Observation*, OMM-N° 488, Genève.
- Organisation Météorologique Mondiale, 2003 : *Manuel du Système Mondial d'Observation*, OMM-N° 544, Genève.
- Paltridge, G.W. and J. Barber, 1988 : Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote-sensing of the Environment*, 25, pp. 381-394.
- Potts, R.J., 1993 : Satellite observations of Mt. Pinatubo ash clouds. *Australian Meteorological Magazine*, 42, pp. 59-68.
- Prata, A.J., 1989 : Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 micron window using AVHRR/2 data. *International Journal of Remote-sensing*, 10, pp. 751-761.
- Prata, A.J., R.P. Cechet, I.J. Barton, and D.T. Llewellyn-Jones, 1990 : The along-track scanning radiometer for ERS-1 : Scan geometry and data simulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote-sensing*, 28, pp. 3-13.
- Rao, P.K., S.J. Holmes, R.K. Anderson, J.S. Winston and P.E. Lehr, 1990 : *Weather Satellites : Systems, Data, and Environmental Applications*. American Meteorological Society, Boston.
- Robinson, J.M., 1991 : Fire from space : Global fire evaluation using infrared remote-sensing. *International Journal of Remote-sensing*, 12, pp. 3-24.
- Saunders, R.W. and K.T. Kriebel, 1988 : An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote-sensing*, 9, pp. 123-150.
- Smith, W.L., 1985 : Satellites. In D.D. Haughton (ed.) : *Handbook of Applied Meteorology*, Wiley, New York, pp. 380-472.
- Smith, W.L. and C.M.R. Platt, 1978 : Comparison of satellite-deduced cloud heights with indications from radiosonde and ground-based laser measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 17, pp. 1796-1802.
- World Meteorological Organisation, 1994a : *Information on Meteorological and Other Environmental Satellites*. Third edition, WMO-No. 411, Geneva.
- World Meteorological Organisation, 1994b : *Application of Satellite Technology : Annual Progress Report 1993*. WMO Satellite report No. SAT-12, WMO/TD-No 628, Geneva.

CHAPITRE 9

MESURES RADAR

9.1 GÉNÉRALITÉS

On trouvera dans le présent chapitre des notions élémentaires sur les radars météorologiques hyperfréquence, utilisés principalement pour observer les hydrométéores dans l'atmosphère. Ce chapitre, étayé par une importante bibliographie, met l'accent sur les caractéristiques techniques et opérationnelles à prendre en compte pour le choix, la mise en place et l'exploitation de radars et de réseaux radar destinés aux Services météorologiques et hydrologiques. On trouvera un bref aperçu des systèmes radar haute fréquence employés pour l'observation de la surface des océans. Les radars utilisés pour l'étude des profils verticaux sont décrits dans le chapitre 5 de la Partie II.

9.1.1 Radars météorologiques

Les radars météorologiques sont en mesure de détecter les précipitations ainsi que les variations de l'indice de réfraction de l'atmosphère pouvant être dues à des fluctuations locales de la température ou de l'humidité. Les échos radar peuvent aussi avoir pour origine des aéronefs, des poussières, des oiseaux ou des insectes. Le présent chapitre porte sur des types de radars couramment utilisés dans le monde entier. Les radars météorologiques dont les caractéristiques se prêtent le mieux à l'observation et à l'étude de l'atmosphère émettent des impulsions électromagnétiques d'une fréquence de 3 à 10 GHz (correspondant à une longueur d'onde de 10 à 3 cm). Ils sont conçus pour détecter et cartographier les zones de précipitations, dont ils mesurent l'intensité et les déplacements, et parfois le type. On fait appel à des fréquences plus élevées pour localiser des hydrométéores de plus petite taille tels que les nuages ou même les gouttelettes de brouillard. Bien que ce type de fréquences ait des applications intéressantes en matière de recherche sur la physique des nuages, on ne s'en sert généralement pas pour la prévision opérationnelle en raison de l'atténuation excessive du signal radar par le milieu qu'il traverse. À plus basses fréquences, les radars sont en mesure de détecter les variations de l'indice de réfraction par ciel clair et sont utilisés pour établir des profils de vent. Bien qu'ils puissent détecter les précipitations, leurs possibilités d'exploration sont limitées par le diamètre de l'antenne nécessaire pour obtenir une bonne résolution spatiale.

Le signal que rétrodiffuse en direction du radar une cible météorologique à partir de l'impulsion reçue

s'appelle un écho. Celui-ci possède une amplitude, une phase et une polarisation. Beaucoup des radars opérationnels dans le monde restent limités à l'analyse de l'amplitude qui est liée à la répartition granulométrique et au nombre des particules se trouvant dans le volume illuminé par le faisceau radar (enveloppe définie par la distribution d'énergie du signal émis). L'amplitude sert à déterminer un paramètre appelé facteur de réflectivité (Z), qui permet, grâce à des relations empiriques, d'évaluer la masse de précipitations par unité de volume ou l'intensité des précipitations. Une des premières applications du radar consiste donc à détecter, à évaluer et à cartographier les précipitations au niveau du sol en temps réel, de manière continue sur de vastes zones géographiques.

Certains radars expérimentaux utilisent la réflectivité mesurée pour deux polarisations du signal émis et reçu. Des recherches sont en cours pour déterminer la valeur et le potentiel de ces systèmes à diversité de polarisation permettant de mesurer les précipitations et de déterminer l'état des cibles hydrométéorologiques, mais de tels systèmes ne sont pas encore opérationnels.

Les radars Doppler sont à même de déterminer le déphasage entre les impulsions émises et les impulsions reçues en retour. Cette différence de phase donne la mesure de la vitesse Doppler moyenne des particules, c'est-à-dire la moyenne pondérée selon la réflectivité, de la composante radiale de la vitesse de déplacement des hydrométéores dans le volume du faisceau radar. La largeur du spectre Doppler permet de mesurer la variabilité de cette vitesse dans l'espace et donne des indications sur le cisaillement de vent et la turbulence. Les radars Doppler élargissent considérablement les possibilités d'observation des radars météorologiques. La plupart des systèmes récents peuvent fonctionner en mode Doppler.

Les radars météorologiques modernes devraient avoir des caractéristiques optimisées pour produire les meilleures données en fonction des besoins opérationnels, et devraient être installés, exploités et entretenus de manière à exploiter au mieux ces capacités pour les intérêts des météorologues.

9.1.2 Caractéristiques des radars, terminologie et unités employées

Il convient de bien choisir les caractéristiques d'un radar en tenant compte du climat et de l'application

considérée afin de déterminer l'exactitude de mesure admissible pour l'estimation des précipitations (tableaux 9.1, 9.2 et 9.3).

Tableau 9.1. Bandes de fréquence des radars

Bandes	Fréquence	Longueur d'onde	Valeur nominale
UHF	300 - 1 000 MHz	1 - 0,3 m	70 cm
L	1 000 - 2 000 MHz	0,3 - 0,15 m	20 cm
S ^a	2 000 - 4 000 MHz	15 - 7,5 cm	10 cm
C ^a	4 000 - 8 000 MHz	7,5 - 3,75 cm	5 cm
X ^a	8 000 - 12 500 MHz	3,75 - 2,4 cm	3 cm
K _u	12,5 - 18 GHz	2,4 - 1,66 cm	1,5 cm
K	18 - 26,5 GHz	1,66 - 1,13 cm	1,25 cm
K _a	26,5 - 40 GHz	1,13 - 0,75 cm	0,86 cm
W	94 GHz	0,3 cm	0,3 cm

^a Bandes de fréquences les plus courantes pour les radars météorologiques

Tableau 9.2. Unités et paramètres employés pour les radars météorologiques

Symbol	Paramètre	Unité
Z_e	Réflectivité radar équivalente ou effective	$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ou dBZ
V_r	Vitesse radiale moyenne	m s^{-1}
σ_v	Largeur du spectre	m s^{-1}
Z_{dr}	Réflectivité différentielle	dB
CDR	Taux de dépolarisation circulaire	dB
LDR	Taux de dépolarisation linéaire	dB
K_{dp}	Phase de propagation	degrés km^{-1}
ρ	Coefficient de corrélation	

9.1.3 Applications météorologiques

On a constaté l'utilité des observations par radar :

- Pour la détection, le suivi et l'alerte des phénomènes météorologiques extrêmes ;
- Pour la surveillance des systèmes météorologiques d'échelle synoptique et de méso-échelle ;
- Pour l'évaluation de la quantité de précipitations.

Les caractéristiques d'un radar donné ne sont jamais idéales pour l'ensemble des applications. En général, on optimise les critères de sélection d'un système radar de façon qu'ils soient appropriés

Tableau 9.3. Unités et paramètres physiques employés pour les radars

Symbol	Paramètre	Unité
c	Vitesse de la lumière	m s^{-1}
f	Fréquence d'émission	Hz
f_d	Décalage Doppler	Hz
P_r	Puissance de réception	mW ou dBm
P_t	Puissance d'émission	kW
FRD	Fréquence de récurrence	Hz
T	Période de récurrence ($= 1/\text{FRD}$)	ms
Ω	Vitesse de rotation d'antenne	degrés s^{-1} ou tr/min
λ	Longueur d'onde de l'onde émise	cm
ϕ	Angle d'azimut	degrés
θ	Largeur angulaire à demi-puissance	degrés
τ	Durée d'impulsion	μs
γ	Angle de site	degrés

pour plusieurs applications, mais on peut aussi choisir des critères optimisés en fonction d'une seule application de grande importance. Le choix de la longueur d'onde, de l'ouverture angulaire du faisceau, de la durée d'impulsion et des fréquences de répétition (FRD ou PRF en anglais) a des conséquences importantes. Les utilisateurs doivent donc définir soigneusement les applications envisagées et la climatologie avant de spécifier les caractéristiques d'un radar.

• Détection des phénomènes météorologiques extrêmes et alerte

Le radar est le seul moyen réaliste de suivre, à partir du sol, des phénomènes météorologiques extrêmes sur une vaste zone. On peut, en se fondant sur l'intensité des échos, leur surface et leur allure, identifier les zones où apparaissent de tels phénomènes, et notamment des orages avec risque de grêle et de vents causant des dommages. Les radars Doppler apportent une nouvelle dimension en permettant d'identifier et de mesurer les vents intenses accompagnant les fronts de rafales, les rafales descendantes et les tornades. La portée nominale de ces radars est d'environ 200 km, ce qui est suffisant pour les prévisions et les alertes météorologiques locales à courte échéance. On fait appel à des réseaux de radars pour accroître cette portée (Browning et al., 1982). Un personnel vigilant et bien formé est nécessaire pour interpréter correctement les données obtenues pour des alertes de qualité.

• Surveillance des systèmes d'échelle synoptique et de méso-échelle

Si le relief ne s'y oppose pas, les radars permettent de suivre presque en continu et sur de vastes zones (portée: environ 220 km, superficie couverte: environ 125 000 km²) les phénomènes météorologiques liés aux perturbations d'échelle synoptique ou de méso-échelle. A cause des échos de sol à courtes distances et de la sphéricité de la Terre, la portée maximale des observations météorologiques est en pratique d'environ 200 km. Sur les grandes étendues d'eau, d'autres moyens d'observation sont souvent inexistant ou impossibles à mettre en œuvre. Les réseaux permettent d'accroître la couverture radar et peuvent être d'un bon rapport coût-efficacité. Les radars fournissent une bonne description des précipitations. Les faisceaux radar les plus étroits fournissent une meilleure résolution spatiale et une plus grande performance aux longues distances. Dans les régions où des précipitations très intenses et étendues sont courantes, il est nécessaire de choisir une longueur d'onde de 10 cm. Dans d'autres régions telles que les latitudes moyennes, des radars ayant une longueur d'onde de 5 cm peuvent être très efficaces pour un prix nettement moins élevé. Une longueur d'onde de 3 cm souffre d'une atténuation des précipitations trop importante pour être très efficace, sauf en cas de pluie ou de neige très légères. On a commencé à développer des réseaux denses de radars 3 cm ayant une capacité polarimétrique qui pourraient résoudre le problème d'atténuation des radars 3 cm isolés.

• Évaluation des précipitations

Le radar est employé depuis longtemps pour évaluer l'intensité, donc la quantité et la répartition des précipitations avec une bonne résolution spatio-temporelle. La plupart des études réalisées portent sur la pluie, mais il est également possible de faire des mesures de neige en tenant compte correctement de la composition des cibles. On trouvera chez Joss et Waldvogel (1990) et chez Smith (1990) une analyse détaillée de l'état actuel des connaissances, des techniques employées, des problèmes qui se posent, des pièges à éviter ainsi que de l'efficacité et de l'exactitude de ces évaluations.

Les estimations de précipitations au sol à l'aide de systèmes radar classiques sont faites typiquement sur des surfaces de l'ordre de 1 à 2km², à la fréquence de 5 à 10 minutes, en utilisant une basse élévation du faisceau radar et une ouverture angulaire du faisceau de l'ordre de 1°. On a constaté que les estimations radar sont comparables aux relevés ponctuels obtenus à partir de pluviomètres à un facteur de deux près. Les mesures réalisées par pluviomètre et par radar sont des évaluations d'un paramètre en constante évolution. Alors que le pluviomètre échantillonne une superficie extrêmement réduite (100 à 200 cm²),

le radar intègre un volume à bien plus grande échelle. Il est possible de rapprocher des deux mesures en corrigeant les estimations radar à l'aide de données pluviométriques.

9.1.4 Produits météorologiques

Un radar permet d'obtenir différents produits météorologiques pouvant donner lieu à diverses applications. Les produits fournis à partir d'un radar météorologique dépendent du type de radar, de ses caractéristiques de traitement des signaux et du système de commande et d'analyse qui lui est associé. La plupart des radars modernes effectuent automatiquement un balayage volumique consistant en un certain nombre de rotations complètes de l'antenne en azimut, pour divers angles de site. Toutes les données polaires brutes obtenues sont stockées dans une base de données tridimensionnelle communément appelée base de données volumique, qui sert de source de données pour le traitement et l'archivage ultérieurs des données. Un logiciel d'application permet de produire et d'afficher un grand nombre de produits météorologiques sous forme d'images sur un écran couleur haute résolution. Les valeurs de grille ou de pixel et la conversion en coordonnées x-y sont calculées au moyen de techniques d'interpolation tridimensionnelle. Dans le cas d'un radar météorologique Doppler de type courant, les variables affichées sont la réflectivité, l'intensité des précipitations, la vitesse radiale et la largeur de spectre. Chaque pixel d'une image représente la valeur d'une variable sélectionnée codée selon une échelle de couleurs.

Voici une liste de mesures et de produits dont la plupart sont présentés dans ce chapitre.

- a) Indicateur panoramique à élévation constante (plan position indicator PPI). Il permet la représentation polaire d'une variable à partir d'une seule rotation complète d'antenne pour un angle de site donné. Il s'agit de l'affichage radar classique, utilisé principalement pour la surveillance météorologique.
- b) Indicateur de hauteur et de distance (range height indicator RHI). Il permet de représenter une variable à partir d'un seul balayage vertical en site, généralement de 0 à 90°, pour un gisement donné. Il s'agit aussi d'un affichage radar classique montrant des coupes transversales détaillées, qui sert à identifier les forts orages, la grêle et la bande brillante.
- c) Indicateur de position panoramique à altitude constante (constant altitude plan position indicator CAPPI). Il permet de représenter une coupe horizontale d'une variable à une altitude donnée par interpolation à partir des données volumiques. On s'en sert pour la surveillance et l'identification des forts orages. Il

- est également utile, en matière de circulation aérienne, pour le suivi des conditions météorologiques à des niveaux de vol donnés. Les zones «sans données» visibles dans cette représentation loin ou près du radar (fonction de l'altitude sélectionnée), sont comblées respectivement par les données des sites de mesure le plus élevé et le plus bas dans une autre forme de CAPPI appelée «pseudo CAPPI».
- d) Coupe verticale. Il s'agit de la représentation de la distribution verticale d'une variable au-dessus d'un tracé défini par l'utilisateur (ne passant pas nécessairement par le radar). On l'obtient par interpolation à partir des données volumiques.
 - e) Maximum vertical. Représentation en plan de la valeur maximale d'une variable au-dessus de chaque point de la zone observée.
 - f) Hauteur du sommet des échos (echo tops). Représentation en plan de l'altitude la plus élevée à laquelle est observée une valeur de réflectivité donnée, qu'on obtient en analysant les données volumiques. Il s'agit d'un indicateur de phénomènes météorologiques extrêmes et de grêle.
 - g) Contenu en eau intégré (vertically integrated liquid VIL). Représentation en plan du contenu en eau intégré sur une couche définie de l'atmosphère, qui indique l'intensité des forts orages.
- Outre ces représentations standard de base, d'autres produits peuvent être générés pour répondre aux besoins particuliers des utilisateurs dans les domaines de l'hydrologie, des prévisions immédiates (voir section 9.10) et de l'aéronautique.
- a) Précipitations cumulées. Évaluation des précipitations cumulées dans le temps en chaque point de la zone observée.
 - b) Précipitation totale par sous-bassin. Précipitations cumulées intégrées sur une surface.
 - c) Affichage vitesse-azimut (velocity azimuth display VAD). Permet d'estimer le profil vertical du vent au-dessus du radar. Cette évaluation se fait sur une seule rotation d'antenne pour un angle de site donné.
 - d) Velocity volume processing. Fait appel à des données volumiques tridimensionnelles.
 - e) Trajectoires d'orages. Produit faisant appel à un logiciel complexe, qui permet de déterminer la trajectoire de cellules orageuses et de prévoir la future position du centre de gravité de ces cellules.
 - f) Cisaillement de vent. Estimation des composantes radiale et tangentielle des cisaillements de vent à une altitude définie par l'utilisateur.
 - g) Profil de la divergence. Estimation de la divergence par rapport aux données sur la vitesse radiale à partir desquelles le profil est obtenu, compte tenu de certaines hypothèses.
- h) Mésocyclone. Produit issu d'un logiciel perfectionné de reconnaissance de structures qui identifie les signatures de rotation à partir de données tridimensionnelles sur la vitesse, à l'échelle de la circulation mésocyclonique souvent associée aux tornades.
 - i) Signature du vortex d'une tornade. Produit issu d'un logiciel perfectionné de reconnaissance de structures qui identifie les signatures de cisaillement «porte à porte» à partir de données tridimensionnelles sur la vitesse à l'échelle de la circulation des vortex de tornades.

9.1.5 Besoin d'exactitude des radars

L'exactitude à laquelle sont astreints les radars dépend des applications les plus importantes qui sont envisagées. Les radars modernes, s'ils sont correctement installés, étalonnés et entretenus, sont relativement stables et ne donnent pas lieu à des erreurs sensibles de mesure. Les principaux facteurs d'inexactitude sont des facteurs extérieurs: échos de sol, propagation anormale, atténuation et phénomènes de propagation, effets du faisceau, composition des cibles, et notamment leurs fluctuations dans le plan vertical, relations Z-R entre l'intensité des précipitations et la réflectivité inadéquates.

Si l'on ne considère que les erreurs imputables aux systèmes radar, on peut déterminer les paramètres mesurables des radars avec une exactitude acceptable (voir le tableau 9.4).

Tableau 9.4. Exactitude requise pour les radars

Paramètre	Définition	Exactitude acceptable ^a
ϕ	Angle d'azimut	0,1 degré
γ	Angle de site	0,1 degré
V_r	Vitesse Doppler moyenne	1,0 m s ⁻¹
Z	Réflectivité	1 dBZ
σ_v	Largeur du spectre Doppler	1 m s ⁻¹

^a Ces chiffres sont valables pour un spectre gaussien normal, avec un écart type inférieur à 4 m⁻¹. L'exactitude de la vitesse mesurée diminue et l'exactitude de la réflectivité mesurée augmente, quand la largeur du spectre augmente.

9.2 TECHNIQUE DU RADAR

9.2.1 Principes de la mesure radar

Les principes du radar et l'observation des phénomènes météorologiques par radar ont été établis dans les années 40. Depuis cette époque, on a consi-

déablement amélioré le matériel, le traitement des signaux et des données ainsi que leur interprétation. On trouvera de plus amples renseignements à ce propos chez certains auteurs: Skolnik (1970) en ce qui concerne les aspects techniques et le matériel, Battan (1981) en ce qui concerne les phénomènes et les applications météorologiques, Atlas (1964 et 1990), Sauvageot (1982) et l'OMM (1985) pour une étude générale, Rinehart (1991) en ce qui concerne les techniques modernes et Doviak et Zrnic (1993) en ce qui concerne les principes et les applications du radar Doppler. Nous présentons brièvement ces principes ci-après.

La plupart des radars météorologiques sont des radars à impulsions. Une antenne directionnelle émet dans l'atmosphère, par une succession rapide d'impulsions, des ondes électromagnétiques à des fréquences fixes prédéterminées. La figure 9.1 illustre schématiquement le fonctionnement de l'antenne directionnelle d'un radar qui émet un faisceau modelé pulsé d'énergie électromagnétique sur la surface courbe de la Terre et qui illumine une portion d'une cible météorologique. La figure montre clairement certaines des limitations et des contraintes physiques que comporte la technique d'observation. L'altitude minimale à laquelle une observation à grande distance peut être effectuée est par exemple limitée du fait de la sphéricité de la Terre.

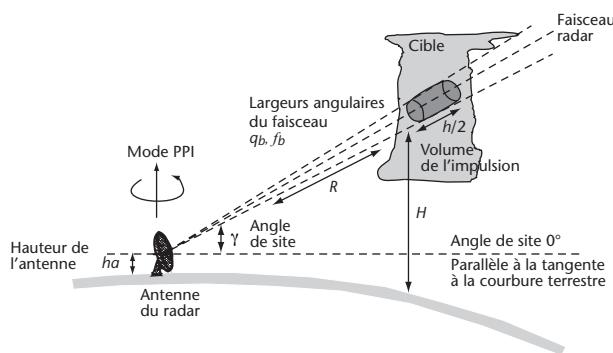


Figure 9.1. Propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère dans le cas d'un radar météorologique à impulsions : h_a désigne l'altitude de l'antenne au-dessus du sol, R la portée de l'antenne, $h/2$ la longueur des impulsions et H la hauteur des impulsions au-dessus du sol.

Un réflecteur parabolique situé dans le système d'antenne concentre l'énergie électromagnétique dans le faisceau de forme conique, qui est hautement directionnel. La largeur du faisceau s'accroît avec la distance. Un faisceau nominal d'un degré, par exemple, atteint une largeur de 0,9, 1,7 et 3,5 km pour une distance de 50, 100 et 200 km respectivement.

Les brèves impulsions d'énergie électromagnétique sont absorbées et diffusées par toute cible météorologique rencontrée. Une partie de l'énergie diffusée est renvoyée vers l'antenne et le récepteur radar. Comme les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière ($2,99 \times 10^8$ m s $^{-1}$), on peut déterminer la distance de la cible en mesurant le temps qui s'écoule entre le moment où l'impulsion est émise et celui où elle revient. Entre les impulsions successives, le récepteur reste en attente d'un éventuel retour d'onde. Le signal de retour émanant de la cible est communément appelé écho radar.

L'intensité du signal renvoyé au récepteur radar est fonction de la concentration, de la granulométrie et de la phase des particules précipitantes qui constituent la cible. La puissance de réception P_r , qui permet ainsi de mesurer les caractéristiques de la cible météorologique, est liée, mais pas de façon exclusive, à l'intensité des précipitations en fonction de leur forme. L'«équation radar fonction de la distance» relie la puissance du signal reçu de la cible, aux caractéristiques du radar et aux paramètres de la cible.

Les mesures de puissance sont déterminées par la puissance totale du signal rétrodiffusé par la cible dans un volume sondé à un instant donné : l'enveloppe d'impulsions (i.e. le volume de résolution ou volume échantillonné). La taille du volume de résolution dépend de la profondeur radiale des impulsions (h) ainsi que de la largeur du faisceau dans le plan vertical (ϕ_b) et horizontal (θ_b). Cette largeur, donc la taille du volume de résolution, augmente avec la distance. Comme le signal reçu par le radar fait un aller-retour, la longueur des impulsions dans l'enveloppe ($h/2$) n'est égale qu'à la moitié de leur longueur dans l'espace (h) et ne varie pas avec la distance. La position du volume de résolution dans l'espace est déterminée par l'orientation de l'antenne en gisement et en site et par la distance de la cible. La distance (r) est déterminée par le temps qu'il faut à une impulsion pour atteindre la cible et revenir au radar.

Les particules situées dans le volume de résolution se déplacent constamment les unes par rapport aux autres, ce qui entraîne des effets de phase dans le signal diffusé et des variations d'intensité par rapport à l'intensité moyenne de la cible. Une seule mesure de l'intensité de l'écho d'une cible météorologique a peu de valeur en soi. Il faut intégrer un minimum de 25 à 30 impulsions pour obtenir une estimation correcte de l'intensité moyenne (Smith, 1995). Normalement, cela se fait de façon électronique dans un circuit d'intégration. On réintègre fréquemment cette moyenne des impulsions en

distance radiale, en gisement et dans le temps pour accroître la taille de l'échantillon et l'exactitude de l'estimation, ce qui conduit à une diminution de la résolution spatiale.

9.2.2 Équation radar dans le cas des précipitations

Les cibles météorologiques consistent en une enveloppe de particules plus ou moins sphériques composées entièrement d'eau et/ou de glace et réparties dans l'espace de façon aléatoire. La puissance rétrodiffusée par la cible dépend du nombre, de la granulométrie, de la composition, de la position relative, de la forme et de l'orientation des particules diffusantes. La puissance totale rétrodiffusée est la somme de la puissance rétrodiffusée par chacune de ces particules.

En se fondant sur ce modèle de cible et sur la théorie électromagnétique, Probert-Jones (1962) a proposé une relation entre la puissance de l'écho reçu par le radar, les paramètres du radar, la distance des cibles et les caractéristiques de diffusion. On considère généralement que cette relation permet d'obtenir une mesure quantitative de la réflectivité avec une exactitude suffisante si l'on tient compte des hypothèses现实的 admises dans la fonction :

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \cdot \frac{P_t h G^2 \theta_b \phi_b}{\lambda^2} \cdot \frac{|K|^2 10^{-18} Z}{r^2} \quad (9.1)$$

où \bar{P}_r désigne la moyenne sur plusieurs impulsions de la puissance du signal renvoyé au radar, exprimée en watts, P_t la puissance de l'impulsion émise par le radar, exprimée en watts, h la longueur des impulsions dans l'espace, exprimée en mètres ($h = ct/2$, où c désigne la vitesse de la lumière et t la durée d'impulsion), G le gain de l'antenne par rapport à une antenne isotrope, θ_b et ϕ_b la largeur angulaire dans le plan horizontal et vertical, exprimée en radians, du diagramme de rayonnement de l'antenne à un niveau - 3 dB par rapport à la transmission dans l'axe d'émission, λ la longueur d'onde de l'onde émise, exprimée en mètres, $|K|^2$ l'indice de réfraction de la cible, r la distance sur le trajet du faisceau séparant le radar de la cible, exprimée en mètres, et Z le facteur de réflectivité radar, exprimé en $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ (que l'on considère généralement comme égale à la réflectivité radar équivalente Z_e lorsqu'on connaît mal les caractéristiques de la cible).

Le deuxième terme de l'équation contient les paramètres propres au radar, et le troisième les paramètres dépendant de la distance et des caractéristiques de la cible. À l'exception de la puissance d'émission, les paramètres du radar sont relativement constants.

Si l'émetteur est exploité et maintenu à puissance constante, comme cela devrait être le cas, l'équation peut se simplifier en :

$$\bar{P}_r = \frac{C |K|^2 Z}{r^2} \quad (9.2)$$

où C désigne la constante radar.

La formulation de cette équation est fondée sur plusieurs hypothèses de base ayant une importance variable pour l'application et l'interprétation des résultats. Bien qu'elles soient globalement respectées, les conditions réelles ne les respectent pas toujours parfaitement. Dans certains cas particuliers, elles influent significativement sur les mesures (Aoyagi et Kodaira, 1995). Les hypothèses en question se résument ainsi :

- a) Les particules diffusantes de précipitation présentes dans l'enveloppe de la cible sont des sphères diélectriques homogènes de faible diamètre par rapport à la longueur d'onde ($D < 0,06 \lambda$), de façon que l'approximation de diffusion de Rayleigh puisse s'appliquer de façon stricte ;
- b) L'enveloppe d'impulsions est entièrement remplie de particules précipitantes diffusées de façon aléatoire ;
- c) La réflectivité Z est uniforme dans la totalité du volume de résolution, et constante pendant la durée d'échantillonnage ;
- d) Les particules sont toutes en phase liquide ou solide ; autrement dit, elles ont toutes le même indice de réfraction $|K|^2$ et la diffusion de la puissance par les particules est isotrope ;
- e) La diffusion multiple (parmi les particules) est négligeable ;
- f) Il n'y a aucune atténuation dans l'espace situé entre le radar et la cible ;
- g) Les ondes incidentes et rétrodiffusées subissent une copolarisation linéaire ;
- h) Le lobe principal du diagramme de rayonnement de l'antenne est de forme gaussienne ;
- i) L'antenne est un réflecteur parabolique de section circulaire ;
- j) Le gain de l'antenne est connu ou peut être calculé avec une exactitude suffisante ;
- k) La contribution des lobes secondaires à la puissance de réception est négligeable ;
- l) Le blocage du faisceau émis par des obstacles (relief, etc.) est négligeable ;
- m) La puissance P_t de l'impulsion émise par l'antenne est la puissance réelle d'émission ; autrement dit, l'affaiblissement imputable au guide d'ondes et à d'autres éléments et l'atténuation due au radôme du radar sont pris en compte ;
- n) La moyenne de la puissance mesurée \bar{P}_r est établie sur un nombre suffisant d'impulsions

ou d'échantillons indépendants pour être représentative de la moyenne du volume de résolution de la cible.

Cette formulation simplifiée établit un rapport entre la puissance d'écho mesurée par le radar et la réflectivité radar Z , qui est elle-même en rapport avec l'intensité des précipitations. Ces facteurs et leurs rapports sont des éléments essentiels pour interpréter l'intensité de la cible et pour évaluer la hauteur des précipitations à partir des mesures effectuées par radar. Malgré le nombre des hypothèses émises, cette formulation donne une estimation correcte de la masse de la cible. Une telle estimation peut être affinée en tenant davantage compte des facteurs considérés dans les hypothèses.

9.2.3 Radar météorologique de base

Le radar météorologique de base se compose :

- D'un émetteur émettant dans les hyperfréquences ;
- D'une antenne qui concentre les ondes émises en un faisceau étroit et reçoit les ondes rétrodiffusées ;
- D'un récepteur qui détecte, amplifie et traduit le signal hyperfréquence renvoyé en ondes basses fréquences ;
- D'un système de traitement qui extrait l'information voulue du signal reçu ;
- D'un système qui affiche l'information sous une forme intelligible.

Les autres éléments qui permettent d'optimiser les capacités d'un radar sont :

- Un processeur permettant de produire d'autres affichages ;
- Un système d'enregistrement permettant de stocker les données dans un but de formation, d'étude ou d'archivage.

Un radar météorologique de base peut être non cohérent dans le sens où la phase des impulsions successives est aléatoire et inconnue.

Les systèmes actuels font presque tous appel à des ordinateurs pour la commande des radars, le traitement numérique des signaux, l'enregistrement, l'affichage des produits et l'archivage.

La puissance du signal rétrodiffusé reçue par un radar caractéristique est typiquement de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-15} W, soit environ 70 dB entre les niveaux extrêmes d'intensité. Pour couvrir correctement une telle plage de puissance, on a fait appel à un récepteur logarithmique par le passé. De nos jours, toutefois, des radars opérationnels et expérimentaux équipés de récepteurs linéaires possédant une dyna-

mique de 90 dB (et d'autres caractéristiques perfectionnées) ont fait leur apparition (Heiss, McGrew et Sirmans, 1990 ; Keeler, Hwang et Loew, 1995). Le processeur doit effectuer la moyenne de nombreuses impulsions pour produire une mesure significative. Il est possible d'intégrer les impulsions de diverses façons, généralement sous forme numérique, en tenant compte de la fonction de transfert du récepteur (linéaire ou logarithmique). Dans la pratique, dans un système type, le signal reçu par l'antenne est amplifié, moyené sur plusieurs impulsions, corrigé selon le transfert du récepteur, puis converti en un facteur de réflectivité radar Z au moyen de l'équation du radar.

Le facteur de réflectivité est le paramètre le plus important pour l'interprétation des données radar. Ce facteur, obtenu à partir du modèle de diffusion de Rayleigh, se définit théoriquement comme la somme des diamètres de toutes les particules (gouttes) contenues dans le volume sondé, élevés à la puissance six :

$$Z = \sum_{\text{vol}} D^6 \quad (9.3)$$

où Z est exprimé en $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$. Dans de nombreux cas, le nombre, la composition et la forme des particules sont inconnus et l'on définit un facteur de réflectivité équivalente ou effective Z_e . Pour la neige et la glace, il faut prendre la réflectivité équivalente Z_e qui correspond à Z si l'on suppose que les particules rétrodiffusées sont des gouttes sphériques.

Il est courant de travailler dans une échelle logarithmique en unités dBZ, qui se définissent numériquement par $\text{dBZ} = 10 \log_{10} Z_e$.

Normalement, les observations volumiques s'effectuent en exécutant un balayage d'antenne complet pour un angle de site donné, puis en augmentant progressivement cet angle à chaque rotation d'antenne. Il est important de tenir compte de la résolution des cibles. Les antennes à réflecteur parabolique servent à concentrer les ondes en un faisceau étroit. Plus le réflecteur est grand, donc coûteux, plus le faisceau est étroit et plus la résolution et la sensibilité sont élevées. La largeur angulaire du faisceau dit à 3 dB – angle mesuré à partir de la ligne située entre deux points d'une coupe du faisceau où la puissance est égale à la moitié de celle de l'axe – dépend de la longueur d'onde. On peut en donner l'approximation suivante :

$$\theta_e = \frac{70\lambda}{d} \quad (9.4)$$

où θ_e est exprimé en degrés et où d désigne le diamètre de l'antenne, exprimé dans la même unité que λ .

Les radars météorologiques de qualité ont une largeur angulaire comprise entre 0,5 et 1 degré.

Sauf en cas de détection d'orages à longue distance, la portée utile des radars météorologiques est de l'ordre de 200 km. Dans le cas par exemple d'un site de 0,5°, le faisceau atteint une hauteur de 4 km au-dessus du sol. La largeur du faisceau est de l'ordre de 1,5 km ou davantage. Pour obtenir de bonnes mesures quantitatives des précipitations, il faut limiter la portée à moins de 200 km. À longue distance, la hauteur du faisceau est trop importante pour obtenir des estimations au niveau du sol. En outre, la divergence du faisceau réduit la résolution, et la mesure peut être affectée par un sous remplissage de la cible. Du point de vue technique, il existe une portée maximale de mesures sans ambiguïté déterminée par la fréquence de récurrence des impulsions (voir l'équation 9.6), la distance devant être mesurée pendant l'intervalle de temps séparant deux impulsions. Dans le cas des PRF habituelles, cela ne pose pas de problème. Pour une PRF de 250 impulsions par seconde par exemple, la portée maximale est de 600 km. Dans le cas d'une PRF plus élevée, par exemple de 1 000 impulsions par seconde, nécessaire pour les systèmes Doppler, la portée est nettement réduite et passe à environ 150 km. De nouveaux progrès pourraient apporter des améliorations à cet égard (Joe, Passarelli et Siggia, 1995).

9.2.4 Radars Doppler

La mise au point et le lancement de radars Doppler de surveillance météorologique élargissent les possibilités d'observation (Heiss, McGrew et Sirmans, 1990). Les radars Doppler mesurent le long d'un axe passant par le radar la vitesse à laquelle les cibles s'approchent ou s'éloignent du radar. La technique Doppler a pour autre avantage la grande sensibilité effective à des cibles de faible réflectivité dont le signal est proche du niveau de bruit du radar lorsqu'il est possible de distinguer le champ de vitesse dans un champ Z perturbé par le bruit.

Dans la plage de vitesses normales des cibles météorologiques, le déplacement de fréquence, relativement faible par rapport à la fréquence du radar, est très difficile à mesurer. Il est plus facile de mesurer la phase de l'impulsion émise, de la comparer à celle de l'impulsion reçue, puis de déterminer le déphasage entre impulsions successives. On établit alors un rapport direct entre le rythme de variation de la phase et le déplacement de fréquence, mis lui-même en rapport direct avec la vitesse de la cible: il s'agit de l'effet Doppler. Si la phase varie de plus de ± 180°, l'évaluation de la vitesse est ambiguë. La vitesse la plus élevée pouvant être mesurée sans ambiguïté par un radar Doppler est celle d'une cible

se déplaçant, entre deux impulsions successives, de plus d'un quart de la longueur d'onde. Pour mesurer correctement une vitesse supérieure à celle-ci, il faut introduire une autre étape dans le traitement.

La vitesse Doppler maximale mesurable sans ambiguïté, qui dépend de la longueur d'onde (λ) du radar et de la fréquence de récurrence PRF, peut s'exprimer de la façon suivante :

$$V_{max} = \pm \frac{PRF \cdot \lambda}{4} \quad (9.5)$$

La portée maximale non ambiguë peut s'exprimer de la façon suivante :

$$r_{max} = \frac{c}{PRF \cdot 2} \quad (9.6)$$

Ainsi, la vitesse V_{max} et la portée r_{max} sont liées par l'équation :

$$V_{max}r_{max} = \pm \frac{\lambda c}{8} \quad (9.7)$$

Ces relations montrent bien les limites imposées par le choix de la longueur d'onde et de la fréquence de récurrence. Une PRF élevée est souhaitable pour accroître la vitesse maximale non ambiguë alors qu'une PRF basse est souhaitable pour accroître la portée du radar. Un compromis est nécessaire jusqu'à ce qu'une technologie plus avancée permette de recueillir des informations sans ambiguïté en dehors de ces limites (Doviak et Zrnic, 1993; Joe, Passarelli et Siggia, 1995). Ce rapport montre aussi que plus la longueur d'onde est élevée, plus les limites sont élargies. Par exemple, pour un radar de type courant fonctionnant en bande S et ayant une FRD de 1 000 Hz, $V_{max} = \pm 25 \text{ m s}^{-1}$, alors que pour un radar en bande X, $V_{max} = \pm 8 \text{ m s}^{-1}$.

Il est nécessaire de connaître la phase de l'impulsion émise du fait que le déplacement de fréquence de l'impulsion de retour se mesure en rapprochant la phase de l'impulsion émise de celle de l'impulsion reçue. Au début des impulsions successives, la phase d'un radar non cohérent est aléatoire et inconnue. On ne peut donc pas faire appel à un tel système pour des mesures Doppler, mais on peut s'en servir pour effectuer les opérations de base indiquées dans la section précédente.

Certains radars Doppler sont entièrement cohérents: leurs émetteurs possèdent des sources de fréquences très stables où la phase est déterminée et connue pour chaque impulsion. Les radars semi-cohérents, où la phase des impulsions successives est aléatoire mais connue, sont plus économiques et plus courants.

En général, dans les radars entièrement cohérents, les amplificateurs de sortie de grande puissance sont équipés de klystrons et la source de fréquence du récepteur est la même que celle de l'émetteur. Cette approche, qui réduit considérablement l'instabilité de phase propre aux systèmes semi-cohérents, permet de mieux éliminer les échos de sol et de mieux distinguer les phénomènes d'air clair de faible intensité, qui, sinon, risqueraient d'être masqués. L'émetteur hyperfréquence des radars non cohérents et semi-cohérents est généralement à magnétron, en raison de la relative simplicité, du faible coût et du fonctionnement généralement correct de ce système pour les observations courantes. Le magnétron a pour avantage secondaire la réduction de la réaction Doppler aux échos de deuxième ou de troisième trace (provenant d'une distance supérieure à la portée maximale non ambiguë) en raison de leur phase aléatoire, bien qu'on puisse obtenir le même effet dans des systèmes cohérents en introduisant des perturbations de phase pseudo-aléatoires connus dans le récepteur et l'émetteur.

Un radar non cohérent est relativement facile à transformer en système Doppler semi-cohérent. Lors d'une telle opération, il faudrait installer un magnétron de type coaxial, qui est plus stable.

La réflectivité et les mesures de vitesse sont obtenues à partir du système radar Doppler. La cible se compose généralement d'un grand nombre d'hydrométéores (gouttes de pluie, flocons de neige, granules de glace, grêle, etc.) de formes et de dimensions mul-

tiples, qui se déplacent à diverses vitesses en raison de turbulences dans le volume de résolution et de vitesses de chute différentes. Le champ de vitesse est par conséquent un spectre de vitesse: il s'agit du spectre Doppler (voir la figure 9.2).

On fait appel à deux systèmes de complexité différente pour traiter les paramètres Doppler. Le système de traitement par paires d'impulsions (PPP), le plus simple, consiste à déduire la vitesse moyenne et la largeur de spectre de la comparaison d'impulsions successives dans le domaine temporel. Dans le deuxième système plus complexe, on utilise une transformation de Fourier rapide (TFR ou FFT en anglais) pour produire un spectre de vitesse continu dans chaque volume sondé. Le système PPP est plus rapide, moins gourmand en temps de calcul et donne de meilleurs résultats pour un faible rapport signal/bruit, mais il élimine moins bien les échos de sol que le système TFR. Dans les systèmes modernes, on fait appel aux meilleurs éléments des deux approches en supprimant les échos de sol grâce à des techniques TFR, puis en utilisant le technique PPP pour déterminer la vitesse radiale et la largeur du spectre.

9.2.5 Radars à diversité de polarisation

On expérimente les radars à diversité de polarisation depuis longtemps pour déterminer leur capacité à améliorer les observations météorologiques par radar (Bringi et Hendry, 1990). Des études encourageantes laissent entrevoir la possibilité d'établir une diffé-

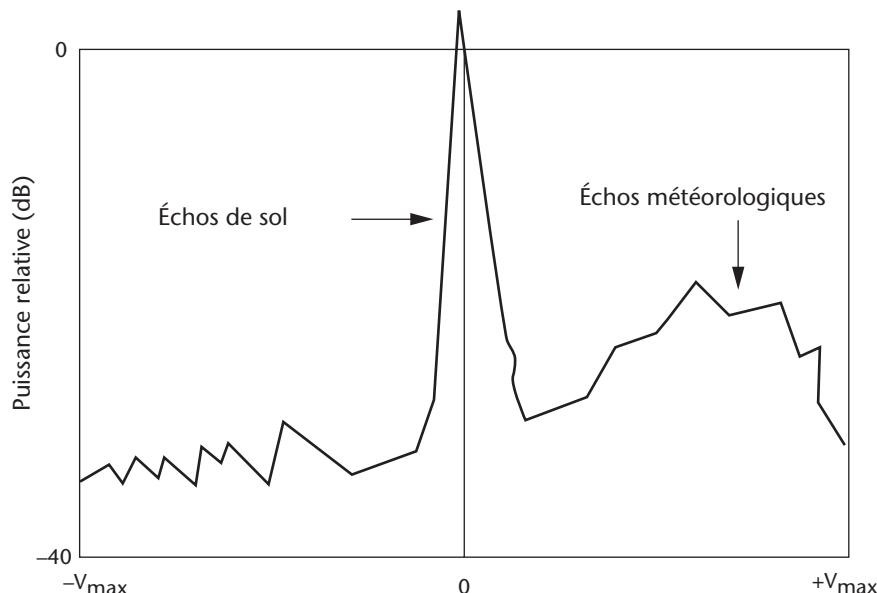


Figure 9.2. Spectre Doppler de l'écho d'une cible météorologique et d'un objet au sol. L'écho de l'objet au sol, qui apparaît autour du zéro, est beaucoup plus étroit que celui de la cible météorologique.

rence entre divers types d'hydrométéores, premier pas vers la distinction entre pluie, neige et grêle. Des difficultés d'ordre pratique sont apparues; les techniques et les applications n'ont pas dépassé le stade de la recherche et n'ont pu atteindre celui de l'exploitation. Les radars à diversité de polarisation devraient améliorer la mesure des précipitations pour autant qu'ils permettront de mieux déterminer la répartition granulométrique des gouttes et de mieux connaître les divers types de précipitations. Des travaux récents réalisés par l'United States National Severe Storms Laboratory (Melnikov *et al.*, 2002) pour adjoindre une capacité polarimétrique aux radars NEXRAD ont fait la preuve de la robustesse d'une conception technique faisant appel à une émission et à une réception simultanées d'impulsions polarisées sur le plan horizontal et vertical. L'évaluation des moments polarimétriques et les produits dérivés concernant la mesure des précipitations et la classification des hydrométéores démontrent que cette conception est très prometteuse en tant que base pour ajouter une diversité de polarisation à l'ensemble du réseau NEXRAD.

Il existe actuellement deux grands types de techniques radar d'usage courant. L'une consiste à émettre une onde à polarisation circulaire et à mesurer la polarisation parallèle et orthogonale. L'autre consiste à émettre alternativement des impulsions à polarisation horizontale et verticale au moyen d'un commutateur haute puissance. On préfère généralement le système linéaire du fait que l'estimation de valeurs météorologiques demande moins de calculs. La seconde technique est plus couramment employée lorsqu'on transforme un radar classique pour lui ajouter un dispositif de polarisation. Cependant, la première possède des avantages techniques certains. Plusieurs bases de polarisation (Holt, Chandra et Wood, 1995) et des systèmes à deux émetteurs (Mueller *et al.*, 1995) en sont à l'étape expérimentale. Ces techniques se différencient de celle des radars classiques surtout par la qualité du système d'antenne, par l'exactitude de l'étalonnage électrique et du traitement des signaux radar. La mise en concordance des faisceaux, la commutation des polarisations et la mesure de légères différences dans les signaux sont des opérations difficiles exigeant une application très minutieuse de ces techniques.

De telles techniques reposent sur d'infimes différences dans les particules diffusantes. Lorsqu'elles tombent librement dans l'atmosphère, les gouttes de pluie, sphériques à l'origine, se transforment en ellipses dont l'axe principal est orienté selon un plan horizontal. Le degré d'aplatissement des gouttes est fonction de leur taille. Si l'on admet la diffusion de Rayleigh comme postulat, la puissance du signal rétrodiffusé par un sphéroïde aplati est plus élevée

dans le cas d'une onde à polarisation horizontale que dans celui d'une onde à polarisation verticale. En posant des hypothèses correctes, on peut déterminer la répartition granulométrique des gouttes et en déduire l'intensité des précipitations.

La réflectivité différentielle Z_{DR} est égale à dix fois le logarithme du rapport entre la réflectivité de polarisation horizontale Z_H et la réflectivité de polarisation verticale Z_V . Il semble qu'en comparant la réflectivité équivalente Z_e et la réflectivité différentielle Z_{DR} , on puisse déterminer si la cible se compose de grêle, de pluie, de bruine ou de neige (Seliga et Bringi, 1976).

La phase du faisceau incident se modifie lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans un milieu composé de particules aplatis. L'effet de cette propagation sur les composantes verticale et horizontale de la phase, qui dépend du degré d'aplatissement, est exprimé par un paramètre appelé phase différentielle (K_{DP}). Ce paramètre possède certains avantages pour la mesure des fortes pluies (Zrnic et Ryzhkov, 1995). English *et al.* (1991) ont démontré que pour l'estimation des taux de pluie, il vaut mieux employer la phase différentielle K_{DP} que la réflectivité Z si l'intensité des précipitations est supérieure à 20 mm h⁻¹ en bande S.

Les effets sur le faisceau incident de la propagation due au milieu traversé risquent de prédominer sur les effets de la rétrodiffusion due à la cible, rendant confuse l'interprétation du signal résultant. Bebbington (1992) a défini, pour les radars à polarisation circulaire, un paramètre appelé degré de polarisation, qui se révèle insensible aux effets de la propagation. Ce paramètre est à rapprocher de la corrélation linéaire utilisée pour les radars à polarisation linéaire. Il semble être intéressant pour la discrimination des cibles. Des valeurs extrêmement faibles indiquent par exemple la présence de milieux diffusants ayant une orientation aléatoire tels que brins d'herbe en suspension dans l'air ou échos de sol (Holt *et al.*, 1993).

9.2.6 Élimination des échos de sol

Les échos émanant d'objets autres que les précipitations sont connus sous le nom d'échos parasites (ou clutter en anglais), qu'il convient d'éliminer, à une exception près: les échos dus à l'air clair ou aux insectes, qui peuvent servir à établir la cartographie des champs de vent. Les échos parasites peuvent avoir pour origine divers types d'objets: bâtiments, collines, montagnes, avions et paillettes, notamment. Le choix de l'emplacement d'un radar est le premier moyen de réduire les échos de sol qui forment une grande part des échos parasites. Cependant, il est impossible de l'éliminer complètement. L'intensité

des échos de sol est inversement proportionnelle à la longueur d'onde (Skolnik, 1970) alors que l'énergie rétrodiffusée par la pluie est inversement proportionnelle à la puissance quatre de la longueur d'onde. C'est pourquoi un radar est d'autant moins sensible aux échos de sol que sa longueur d'onde est courte.

Il y a moyen de faire disparaître des objets ponctuels tels que les avions, s'ils sont isolés, en supprimant l'écho qui occupe un seul volume de résolution radar. Les cibles météorologiques sont réparties sur plusieurs volumes de résolution. Les objets ponctuels peuvent être éliminés pendant la phase de traitement des données. En revanche, il est impossible d'éliminer par cette technique dépendant de leur puissance relative, les objets ponctuels tels que les échos d'avions qui sont inclus dans des échos de précipitations.

Les cibles réparties demandent des techniques plus perfectionnées de traitement des signaux et des données. Une idée intéressante sur le plan théorique est de faire appel à des cartes d'échos fixes. On produit une telle carte à partir du tracé des échos radar en l'absence de précipitations, puis on la soustrait du tracé obtenu en présence de précipitations. Le problème que pose cette technique est que le tracé des échos de sol change avec le temps. Ce changement est imputable essentiellement à l'évolution des conditions météorologiques. Un exemple caractéristique est celui des échos dus à une propagation anormale, qui durent quelques heures puis disparaissent. D'infimes modifications subies par le milieu ambiant se traduisent par de légères fluctuations dans le tracé des échos de sol qui rendent confuse l'utilisation des cartes d'échos fixes. On s'efforce, grâce à des techniques adaptatives (Joss et Lee, 1993), de déterminer les cartes d'échos fixes de façon dynamique pour pouvoir tenir compte des fluctuations à court terme, mais ces techniques ne sont pas assez précises pour qu'on puisse s'en servir de façon exclusive, pour autant qu'on puisse les utiliser.

Dans les techniques de traitement Doppler, on tente d'éliminer les échos de sol présents dans les échos météorologiques par traitement du signal. Selon l'hypothèse retenue, les échos de sol ont une faible largeur spectrale et ces échos sont stationnaires. Cependant, pour respecter ces critères, il faut avoir recueilli et traité un nombre suffisant d'impulsions pour obtenir une résolution spectrale telle qu'il soit possible de distinguer les échos météorologiques de ceux du sol. Il faut également disposer d'un intervalle de Nyquist relativement large pour pouvoir visualiser les échos météorologiques. En général, la largeur spectrale des échos de sol est nettement inférieure à $1 \text{ à } 2 \text{ m s}^{-1}$ tandis que la largeur spectrale

de l'écho météorologique est supérieure à $1\text{--}2 \text{ m s}^{-1}$, ce qui nécessite un intervalle de Nyquist d'environ 8 m s^{-1} . Les échos de sol, généralement stationnaires, sont identifiables dans le spectre grâce à un pic étroit de vitesse nulle (voir la figure 9.2). Ce pic est d'une largeur limitée du fait que les objets qui donnent naissance aux échos de sol, tels que des arbres en oscillation, sont animés d'un certain mouvement. Le traitement des données temporelles en vue d'éliminer la composante vitesse nulle d'une séquence limitée est problématique, car le processus de filtre va également éliminer les échos météorologiques possédant une vitesse nulle (Zrnic et Hamidi, 1981). Un traitement adapté du spectre (transformation de Fourier) est susceptible d'éliminer les échos de sol présents dans des échos météorologiques, même si ces échos se chevauchent (Passarelli *et al.*, 1981; Crozier *et al.*, 1991). C'est là un avantage important du traitement spectral : débarrassés des échos de sol, les paramètres météorologiques pertinents peuvent alors être calculés.

Une autre solution consiste à tirer profit du fait que les structures à l'origine des échos de sol sont d'échelle très réduite (inférieure à 100 m environ). L'échantillonnage en fonction de la distance se fait avec une résolution très fine (inférieure à 100 m) et les échos de sol sont identifiés en utilisant réflectivité et signal Doppler. Une moyenne sur des plages de distances (pour une résolution finale de 1 km) est réalisée pour les signaux non perturbés par des échos de sol. Le but est de détecter et ignorer les mesures impactées par les échos de sol plutôt que de les traiter (Joss et Lee, 1993; Lee, Della Bruna et Joss, 1995). Une telle technique est radicalement différente de celles que nous avons abordées jusqu'ici. Il reste à voir si elle est efficace dans tous les cas et notamment dans les cas de propagation anormale, où les échos de sol sont étendus.

Les paramètres des radars à double polarisation permettent également d'identifier les échos de sol. Cependant, des recherches plus approfondies sont nécessaires pour en déterminer les avantages et les inconvénients.

Il est possible de réduire les échos de sol en choisissant soigneusement le site d'un radar (voir la section 9.7). Les radars utilisés pour une surveillance à longue portée, par exemple pour suivre les cyclones tropicaux ou dans un réseau très dispersé, sont généralement installés sur le sommet de collines ce qui permet d'en accroître la portée utile, mais au risque de capter de nombreux échos de sol. Une technique simple d'élimination de ces échos consiste à balayer automatiquement à plusieurs angles d'élévation et à supprimer les données correspondant aux faibles distances à basse altitude, où se concentre la plus

grande partie des échos de sol. En traitant les données radar pour fabriquer des produits CAPPI, on rejette automatiquement les données de faible altitude aux courtes distances.

9.3 PROPAGATION ET DIFFUSION DES SIGNAUX RADAR

Les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite dans un milieu homogène, à la vitesse de la lumière. L'atmosphère terrestre n'est pas homogène et les ondes hyperfréquence subissent une réfraction, une absorption et une diffusion sur leur trajectoire. En général, l'atmosphère possède une stratification verticale et les ondes changent de direction selon les variations de l'indice de réfraction en fonction de l'altitude (ou de la température et de l'humidité). Lorsque les ondes rencontrent des précipitations ou des nuages, une partie de leur énergie est absorbée, une partie est diffusée dans tous les sens et une partie est rétrodiffusée vers le radar.

9.3.1 Réfraction dans l'atmosphère

Il est possible de prévoir la trajectoire des ondes électromagnétiques à partir du profil vertical de la température et d'humidité (Bean et Dutton, 1966). Dans des conditions atmosphériques normales, les ondes se déplacent selon une courbe qui s'infléchit légèrement vers la Terre. Le trajet des faisceaux peut s'infléchir vers le haut (infraréfraction) ou vers le bas (super-réfraction). Dans les deux cas, la mesure de l'altitude de ces faisceaux sera erronée si l'on s'en tient aux hypothèses de propagation standard dans l'atmosphère.

Du point de vue de la mesure des précipitations, le problème le plus grave se produit en cas de super-réfraction ou de «ducting» (propagation guidée). Le faisceau peut s'infléchir suffisamment pour atteindre le sol et provoquer des échos de sol qui ne devraient normalement pas se produire. Ce phénomène apparaît lorsque l'indice de réfraction décroît rapidement avec l'altitude, par exemple en cas d'augmentation de la température et de diminution de l'humidité avec l'altitude. Il faut tenir compte de ce type d'échos lors de l'estimation de cartes des précipitations. Il s'agit d'un cas de propagation anormale, encore appelée «AP» ou ANAPROP.

Certains échos dits de « ciel clair » se sont dus à des hétérogénéités de turbulence de l'indice de réfraction que l'on trouve dans des zones turbulentes, dans des couches plus stables, dans des cellules de cisaillement du vent ou en cas de forte inversion. Ces échos ont généralement une configuration assez

facilement identifiable, mais ils doivent être éliminés des champs de précipitation (Gossard et Strauch, 1983).

9.3.2 Atténuation dans l'atmosphère

Les ondes hyperfréquence sont susceptibles d'une atténuation par absorption et diffusion due aux gaz atmosphériques, aux nuages et aux précipitations.

- **Atténuation par les gaz**

Les gaz atténuent les ondes hyperfréquence dans la bande 3-10 cm. L'absorption par les gaz atmosphériques est imputable principalement à la vapeur d'eau et aux molécules d'oxygène. L'atténuation due à la vapeur d'eau, directement proportionnelle à la pression et à l'humidité absolue, augmente de façon presque linéaire en fonction inverse de la température. Jusqu'à une altitude de 20 km, la concentration d'oxygène est relativement uniforme. L'atténuation est également proportionnelle au carré de la pression.

L'atténuation par les gaz varie légèrement selon le climat et la saison. Elle est sensible à grande distance pour les longueurs d'onde des radars météorologiques, où pour une portée de 200 km elle peut atteindre 2 à 3 dB pour les plus grandes longueurs d'onde et 3 à 4 dB pour les plus courtes. Il semble utile de procéder à une compensation, opération facile à automatiser. L'atténuation, qui peut être calculée sur une base saisonnière en fonction de la distance pour les trajets du faisceau radar utilisés dans la mesure des précipitations, peut être utilisée pour corriger le champ de précipitations.

- **Atténuation par les hydrométéores**

L'atténuation par les hydrométéores résulte de l'absorption et de la diffusion. Les hydrométéores constituent la source la plus importante d'atténuation. Cette atténuation dépend de la forme, de la dimension, du nombre et de la nature des particules, ce qui rend très difficile sa prise en compte quantitative par des observations radar uniquement. On n'a pas encore réussi à l'éliminer de façon satisfaisante dans les systèmes opérationnels automatisés de mesure. Il faut cependant tenir compte du phénomène et en réduire les effets par une correction subjective fondée sur des connaissances d'ordre général.

L'atténuation par les hydrométéores dépend également de la longueur d'onde du radar. Pour une longueur d'onde de 10 cm, elle est plutôt faible alors qu'elle est très importante pour une longueur d'onde de 3 cm. Pour une longueur d'onde de 5 cm, elle est acceptable sous de nombreux climats, en particulier pour les latitudes moyennes les plus élevées. Une longueur d'onde inférieure à 5 cm se

prête mal à une mesure précise des précipitations, sauf dans le cas des applications à faible distance (voir le tableau 9.5).

Tableau 9.5.
Rapports d'atténuation unidirectionnelle

Longueur d'onde (cm)	Relation (dB km ⁻¹)
10	0,000 343 R ^{0,97}
5	0,001 8 R ^{1,05}
3,2	0,01 R ^{1,21}

Burrows et Attwood (1949). Atténuations unidirectionnelles spécifiques à 18 °C. R en mm h⁻¹.

En ce qui concerne l'évaluation des précipitations par radar, on peut faire des observations d'ordre général quant à l'ampleur de l'atténuation. Celle-ci dépend de la masse d'eau que contient la cible, d'où une atténuation plus importante en cas de forte pluie, alors que les nuages contenant une masse d'eau nettement plus faible entraînent une atténuation moindre. Les particules à l'état solide provoquent une atténuation nettement moindre que les particules à l'état liquide. Les nuages et les nuages de glace provoquent une faible atténuation, dont on peut généralement ne pas tenir compte. Les particules de neige ou de glace (ou les grêlons) peuvent atteindre des dimensions largement supérieures à celles des gouttes de pluie. Elles se couvrent d'une pellicule d'eau lorsqu'elles commencent à fondre, d'où une nette augmentation de la réflectivité, donc des propriétés d'atténuation. Ce phénomène risque de biaiser les estimations de précipitations.

9.3.3 Diffusion par les nuages et les précipitations

Le signal détecté et traité par un radar (autrement dit l'écho) est rétrodiffusé par la cible ou par les hydro-météores. La section efficace de rétrodiffusion (σ_b) se définit comme la superficie d'un diffuseur isotrope qui renverrait à la source d'émission la même puissance que la cible concernée. Mie (1908) a été le premier à déterminer la section efficace de rétrodiffusion des particules sphériques. Rayleigh a constaté que si le rapport entre le diamètre d'une particule et la longueur d'onde est égal ou inférieur à 0,06, on peut faire appel à une expression plus simple pour déterminer la section efficace de rétrodiffusion :

$$\sigma_b = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \quad (9.8)$$

ce qui justifie l'équation (9.3). $|K|^2$, qui désigne l'indice de réfraction, est égal à 0,93 pour l'eau à l'état liquide et à 0,197 pour la glace.

C'est à partir des mesures de puissance du radar qu'on obtient l'intensité du rayonnement diffusé par la cible en faisant appel à l'équation (9.2) sous la forme :

$$z = \frac{CP_{rr}r^2}{|K|^2} \quad (9.9)$$

On trouvera à la section 9.9 un exposé de la méthode d'interprétation de la réflectivité en fonction de l'intensité des précipitations (R) et des problèmes que pose cette méthode.

9.3.4 Diffusion par ciel clair

On a constaté que dans les zones sans nuages précipitants, les échos sont dus essentiellement à des insectes ou à de forts gradients de l'indice de réfraction de l'atmosphère. Ces échos, qui ont une très faible intensité, ne sont détectés que par des radars très sensibles. Les valeurs de la réflectivité équivalente Z_e pour les phénomènes se produisant par ciel clair se situent entre - 5 et - 55 dBZ, bien qu'il ne s'agisse pas dans ce cas de vrais paramètres Z, le processus physique à l'origine des échos étant entièrement différent. Pour la mesure des précipitations, ces échos représentent des «bruits» mineurs dans le signal. On peut généralement les associer à certains phénomènes météorologiques tels qu'une brise de mer ou en cas d'orage. Les échos se produisant par ciel clair peuvent aussi être dus à des oiseaux ou à des insectes en très faible concentration. Des échos de 5 à 35 dBZ ne sont pas inhabituels, surtout en période de migration (voir le tableau 9.6).

Tableau 9.6.
Section efficace de rétrodiffusion de diverses cibles

Objet	σ_b (m ²)
Avion	10 à 1 000
Être humain	0,14 à 1,05
Ballon-sonde	0,01
Oiseau	0,001 à 0,01
Abeille, libellule, papillon de nuit	3×10^{-6} à 10^{-5}
Goutte d'eau de 2 mm	$1,8 \times 10^{-10}$

Bien qu'en cours de traitement normal les signaux radar soient interprétés en fonction de Z ou de R, les caractéristiques de diffusion de l'air clair sont très différentes de celles des hydrométéores. Elles s'expriment le plus souvent en fonction du paramètre de structure de l'indice de réfraction C_n^2 . Il s'agit d'une mesure de la moyenne des carrés des fluctuations de l'indice de réfraction en fonction de la distance (Gossard et Strauch, 1983).

9.4

MESURES DE VITESSES

9.4.1

Spectre Doppler

Les radars Doppler mesurent la vitesse en évaluant le déplacement de fréquence produit par un ensemble de cibles en mouvement. Ils donnent également des informations sur la puissance totale des signaux renvoyés et sur la largeur de spectre des particules précipitantes contenues dans le volume de résolution radar. La vitesse Doppler moyenne, égale à la vitesse moyenne des particules diffusantes pondérées par leur section efficace, correspond essentiellement pour des balayages presque horizontaux à la vitesse à laquelle l'air s'approche ou s'éloigne du radar. De même, la largeur de spectre correspond à la dispersion de la vitesse, autrement dit au cisaillement ou à la turbulence dans le volume de résolution.

Un radar Doppler mesure la phase du signal renvoyé en référence à la phase du signal reçu par rapport à l'émetteur. On détermine la phase sous forme rectangulaire en produisant la composante en phase (I) et la composante en quadrature (Q) du signal. Les composantes I et Q sont des échantillons à distance fixe. Elles sont mesurées et traitées de façon à obtenir la vitesse moyenne et la largeur du spectre.

9.4.2

Ambiguïtés Doppler

Pour détecter des cibles se trouvant à diverses distances d'un radar, on échantillonne périodiquement les signaux renvoyés, en général toutes les microsecondes, afin d'obtenir des informations sur des points situés tous les 150 mètres environ. Cet échantillonnage peut se poursuivre jusqu'au moment d'émettre l'impulsion suivante. Un point échantillonné dans le temps (correspondant à une distance par rapport au radar) prend le nom de «porte» ou de «crête» de distance. La composante radiale du vent pour une zone de perturbations ou de précipitations est cartographiée à mesure qu'elle est balayée par le faisceau radar.

L'utilisation opérationnelle des radars Doppler à impulsions pose un problème fondamental: la levée d'ambiguïté dans l'estimation de la vitesse Doppler moyenne dû au repliement du spectre. Un échantillonnage intermittent d'une fonction variant avec le temps implique qu'il existe une fréquence maximale non ambiguë égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage (f_s). Ainsi, les fréquences supérieures à $f_s/2$ sont «repliées» (superposées) dans le co-intervalle de Nyquist ($\pm f_s/2$) et sont interprétées comme des vitesses comprises entre $-\lambda f_s/4$ et $+\lambda f_s/4$, où λ désigne la longueur d'onde de l'onde émise.

Pour lever l'ambiguïté vitesse, on fait appel à des techniques à double fréquence de récurrence (Crozier *et al.*, 1991; Doviak et Zrnic, 1993) ou à des techniques de continuité (Eilts et Smith, 1990). Dans les premières, on estime la vitesse radiale pour deux fréquences de récurrence distinctes avec deux vitesses maximales non ambiguës différentes, que l'on combine pour obtenir une nouvelle estimation de la vitesse radiale pour une vitesse non ambiguë plus élevée. Dans le cas d'un radar fonctionnant en bande C, la vitesse nominale non ambiguë est par exemple de 16 m s^{-1} pour une FRD de 1 200 Hz et de 12 m s^{-1} pour une FRD de 900 Hz. On peut déduire l'étendue du repliement par la différence entre les deux vitesses estimées pour lever cette ambiguïté jusqu'à une vitesse comprise entre -48 et $+48 \text{ m s}^{-1}$ (voir la figure 9.3).

L'emploi des techniques de continuité repose sur l'existence d'un écho suffisant pour discerner la présence de vitesse repliée et pour la corriger en supposant la continuité de vitesse (aucune discontinuité au-dessus de $2V_{max}$).

L'utilisation de fréquences de récurrence élevées (supérieures à 1 000 Hz environ) impose une limitation de la portée, comme il est indiqué à la section 9.2. Au-delà de la portée maximale, le repliement des vitesses ramène les échos en deçà de cette portée. Dans le cas de radars équipés d'émetteurs cohérents (à klystron, par exemple), tous les échos apparaissent dans les limites de la portée primaire. Dans le cas de systèmes à réception cohérente, les échos de deuxième trace apparaissent sous forme de bruit (Joe, Passarelli et Siggia, 1995; Passarelli *et al.*, 1981).

9.4.3

Mesures par pointage vertical

En principe, un radar Doppler fonctionnant en mode pointage vertical constitue un outil idéal pour obtenir une mesure exacte, à l'échelle des nuages, de la vitesse verticale du vent et de la répartition granulométrique des gouttes (DSD). Cependant, l'exactitude de ces mesures, déduite du spectre Doppler, est limitée par la forte interdépendance mathématique existant entre les deux paramètres. La véritable difficulté découle du fait que le spectre Doppler est mesuré en fonction de la vitesse verticale totale des particules diffusantes : vitesse de chute terminale des hydrométéores, à laquelle s'ajoutent les courants ascendants ou descendants. Pour pouvoir calculer la répartition granulométrique des gouttes à partir de l'incidence verticale du spectre Doppler, il faut exprimer ce spectre en fonction de la seule vitesse verticale. Une erreur de vitesse verticale d'à peine $\pm 0,25 \text{ m s}^{-1}$ peut entraîner une erreur de 100 % dans le calcul des nombres de gouttes (Atlas, Scrivastava et Sekhon, 1973). On a mis au point une technique

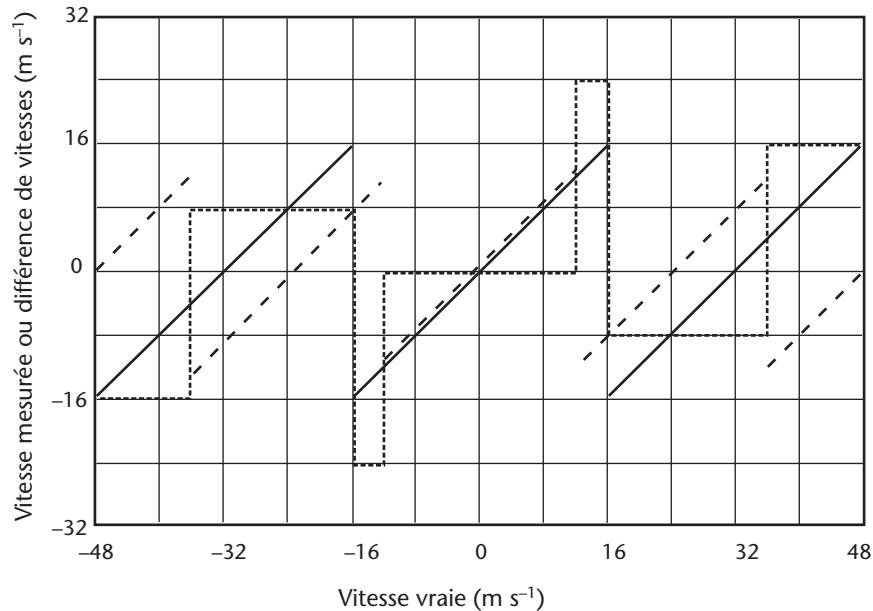


Figure 9.3. Les traits pleins et les tiretés représentent la mesure de la vitesse Doppler effectuée pour deux fréquences de récurrence différentes (1 200 et 900 Hz pour un radar en bande C). Il y a ambiguïté pour toute vitesse supérieure à la vitesse maximale non ambiguë. Les différences entre les mesures de la vitesse Doppler (tiretés et pointillés) sont distinctes et peuvent servir à identifier l'étendue de l'ambiguïté.

faisant appel à deux longueurs d'onde (appelée la méthode Ratio), qui permet de déterminer avec exactitude la vitesse verticale dans l'atmosphère indépendamment de la répartition granulométrique des gouttes. Avec cette technique, on établit un compromis entre la potentielle exactitude et la possibilité d'applications intéressantes.

9.4.4 Mesure des champs de vitesse

L'utilisation d'un seul radar Doppler permet d'obtenir une grande quantité d'informations en temps réel. Il est à noter cependant que l'interprétation de la vitesse radiale évaluée à partir d'un seul radar n'est pas toujours dépourvue d'ambiguïté. L'affichage couleur des tracés de la vitesse radiale indiquée par un seul radar Doppler facilite l'interprétation en temps réel des champs de réflectivité associés et peut révéler d'importantes caractéristiques difficiles à distinguer dans la seule structure de la réflectivité (Burgess et Lemon, 1990). Une telle possibilité est particulièrement intéressante pour l'identification et le suivi des forts orages. Sur la plupart des écrans couleur, on affecte 8 à 15 couleurs ou davantage aux vitesses situées entre $-V_{max}$ et $+V_{max}$. Les vitesses situées en dehors de l'intervalle de Nyquist passent par l'échelle de couleurs en commençant par l'extrême opposée. Le processus peut être répété s'il y a un repliement des vitesses sur plus d'un intervalle de Nyquist.

On peut également utiliser un radar Doppler pour obtenir le profil vertical des vents horizontaux. Lorsque l'antenne du radar est orientée au-dessus de l'horizontale, l'altitude augmente en fonction de la distance. Il est possible d'obtenir un profil du vent selon l'altitude en ajustant les courbes sinusoïdales en fonction des données observées (technique baptisée *Velocity Azimuth Display* (affichage vitesse-azimut) ou VAD, d'après Lhermitte et Atlas, 1961) si le vent est relativement uniforme dans la zone balayée. Le long de la courbe correspondant à une vitesse radiale nulle, les vents sont perpendiculaires à l'axe du faisceau radar. Les données VAD obtenues pour des systèmes de précipitations de grande échelle sont faciles à interpréter sur des écrans couleur. Dans le cas de précipitations de grande étendue, un tracé conique élevé, tout à fait caractéristique, fait apparaître une courbe en forme de S pour une vitesse radiale nulle lorsque le vent moyen tourne avec l'altitude (Wood et Brown, 1986). Dans d'autres cas, on peut distinguer des courbes fermées représentant des courants-jets.

Comme les mesures ont une bonne exactitude, on peut également évaluer la divergence au moyen de la technique VAD. Cette technique ne peut cependant pas être employée de façon précise en cas de précipitations de convection autour du radar. On a quand même réussi, au moyen de radars Doppler sensibles et moyennement puissants, à obtenir par cette

technique des profils du vent et des estimations de la divergence dans la zone limite, lorsqu'elle est optiquement dégagée, pendant tous les mois de l'année sauf les plus froids, jusqu'à une altitude de 3 à 5 km au-dessus du sol. La technique VAD semble bien adaptée à la mesure de vents émanant de systèmes de précipitations associés à des cyclones tropicaux et extratropicaux. Lorsque le radar fonctionne en mode ciel clair, une série chronologique de mesures de la divergence et de la vitesse verticale déduite est particulièrement utile pour établir une prévision immédiate de la probabilité de convection profonde.

Depuis le milieu des années 70, on procède à des expériences de mesure de champs de vent tridimensionnels au moyen de réseaux de plusieurs radars Doppler. Les mesures effectuées en un endroit donné, dans une zone de précipitation, peuvent être combinées au moyen d'une transformation géométrique appropriée pour produire les trois composantes du vent. On peut également aboutir à de telles estimations au moyen de deux radars uniquement en faisant appel à l'équation de continuité. Browning et Wexler (1968) ont présenté une analyse cinématique d'un champ de vent.

9.5

SOURCES D'ERREURS

• Remplissage du faisceau radar

Dans de nombreux cas, et surtout à grande distance du radar, le volume de résolution n'est pas entièrement remplie de précipitations homogènes. L'intensité des précipitations varie souvent considérablement à petite échelle. À grande distance du radar, le volume de résolution s'accroît et les effets dus à la rotundité de la Terre deviennent significatifs. En général, les mesures peuvent être utiles sur le plan quantitatif pour une distance inférieure à 100 km. Cela est important pour la mesure de la hauteur du sommet des nuages et pour l'évaluation de la réflectivité.

• Caractère non uniforme de la répartition verticale des précipitations

Le premier paramètre à considérer lors d'une mesure de signaux radar est généralement l'intensité des précipitations au niveau du sol. En raison des effets de l'ouverture angulaire du faisceau, de l'inclinaison du faisceau et de la sphéricité de la Terre, les mesures radar concernent des précipitations en altitude dont la moyenne est établie sur tranche verticale très importante. Ces mesures, qui dépendent des détails de la répartition verticale des précipitations, peuvent contribuer à d'importantes erreurs dans l'évaluation des précipitations au sol.

• Variations de la relation Z-R

Diverses relations Z-R ont été établies selon le type de précipitation. Il est cependant impossible de distinguer uniquement à partir d'un radar (à l'exception des radars à double polarisation), les divers types d'hydrométéores et leur distribution granulométrique. Dans les applications opérationnelles, cette diversité peut constituer une source importante d'erreurs.

• Atténuation par les précipitations sur le trajet du faisceau

L'atténuation due à la pluie est parfois importante, surtout pour les longueurs d'onde les plus courtes (5 et 3 cm). L'atténuation due à la neige, bien qu'elle soit moindre que celle due à la pluie, peut être également importante dans le cas de trajectoires longues.

• Blockage du faisceau

Selon l'emplacement du radar, le faisceau peut être partiellement ou intégralement occulté par la topographie ou par des obstacles situés entre le radar et la cible. Dans un tel cas, on aboutit à une sous-évaluation de la réflectivité, donc de l'intensité des précipitations.

• Atténuation due au radôme mouillé

La plupart des antennes radar sont protégées du vent et de la pluie par un radôme, généralement réalisé en fibre de verre. Celui-ci est conçu de manière à limiter la déperdition d'énergie rayonnée. Il est par exemple facile, dans des conditions normales, de limiter la déperdition bidirectionnelle qui lui est due à moins de 1 dB en bande C. Cependant, en cas de fortes précipitations, la surface du radôme peut se recouvrir d'une fine pellicule d'eau ou de glace, d'où une forte atténuation dépendant du gisement en azimut. L'expérience des radars NEXRAD WSR-88D indique qu'en enduisant les radômes d'une peinture hydrophobe spéciale, on élimine la plus grande partie de cette source d'atténuation, du moins pour une longueur d'onde de 10 cm.

• Interférences électromagnétiques

Les interférences électromagnétiques dues à d'autres radars ou à des appareils assurant des liaisons hertziennes peuvent constituer un facteur d'erreur important dans certains cas. Ce type de problème est facile à reconnaître par l'observation. Il peut se résoudre par la négociation, par un changement de fréquence, par l'emploi de filtres dans le récepteur radar et parfois au moyen de logiciels.

• Échos de sol

La contamination des échos des précipitations par les échos de sol risque d'entraîner des erreurs très importantes dans l'estimation des précipitations

et du vent. Il convient en premier lieu de réduire les échos de sol au minimum en concevant correctement l'antenne et en choisissant judicieusement l'emplacement du radar. Leurs effets peuvent être sensiblement réduits grâce à un ensemble de dispositifs « hardware » de suppression des échos de sol (Aoyagi, 1983) et lors du traitement des signaux et des données. Les échos de sol augmentent considérablement en cas de propagation anormale.

• ***Propagation anormale***

Une propagation anormale infléchit le trajet du réseau radar. Elle a pour effet d'accroître les échos de sol en faisant dévier le faisceau vers le sol. Elle peut également amener le radar à détecter des précipitations situées bien plus loin que sa portée normale, ce qui conduit à des erreurs de détermination de leur distance en raison de l'ambiguïté sur les distances due au repliement des distances. Une propagation anormale est fréquente dans certaines régions lorsque de fortes baisses d'humidité et/ou de fortes augmentations de température se produisent avec l'altitude. Les retours des échos de sol dus à une propagation anormale risquent d'induire en erreur des observateurs inexpérimentés. Il est plus difficile de les éliminer complètement en les traitant à la façon des échos de sol habituels.

• ***Précision de l'antenne***

Un système bien conçu permet de déterminer la position de l'antenne à 0,2 degré près. Une ouverture angulaire excessive du faisceau ou l'existence de lobes secondaires peuvent être source d'erreurs en cas d'échos de sol ou de forts échos dus aux précipitations.

• ***Stabilité électronique***

Les systèmes électroniques modernes peuvent subir de légères variations avec le temps. Celles-ci peuvent être maîtrisées grâce à un dispositif de régulation bien conçu qui limitera les variations du matériel électronique à moins de 1 dB ou qui déclenchera une alarme en cas d'anomalie.

• ***Précision du traitement***

Le traitement des signaux doit être conçu de façon à optimiser la capacité d'échantillonnage du système. Il s'agit de réduire la variance au minimum lors de la mesure de la réflectivité, de la vitesse Doppler et de la largeur du spectre. Le repliement des distances et vitesses peut constituer une source d'erreurs importante.

• ***Équation radar***

L'interprétation, des mesures de puissance reçues par un radar en terme de paramètre météorologique Z à l'aide de l'équation radar dépend de nombreuses hypothèses. Le non-respect de ces hypothèses peut conduire à des erreurs.

9.6

OPTIMISATION DES CARACTÉRISTIQUES DES RADARS

9.6.1

Choix d'un radar

Un radar est un système d'observation hautement efficace. L'efficacité d'un radar pour une application, quelle qu'elle soit, dépend des caractéristiques de l'appareil et de la climatologie. Il n'existe pas de radar ayant une efficacité maximale pour toutes les applications. On peut choisir les caractéristiques d'un radar de manière à optimiser ses capacités pour une ou plusieurs applications telles que la détection de tornades. Dans la plupart des cas, pour des applications générales, on consent à un compromis afin de répondre à diverses exigences de l'utilisateur. Nombre des caractéristiques d'un radar sont interdépendantes du point de vue des performances, d'où la nécessité d'une optimisation pour obtenir un cahier des charges acceptable. Le coût est un élément important. On peut faire apparaître l'interdépendance de la plupart des caractéristiques au moyen de l'équation radar. Voici un bref aperçu de certains des facteurs les plus importants.

9.6.2

Longueur d'onde

Plus la longueur d'onde est importante, plus le coût du système radar est élevé, et particulièrement le coût de l'antenne pour une ouverture angulaire (c'est-à-dire une résolution) comparable. Ce coût est dû à l'importance du matériel mis en œuvre, mais aussi à la difficulté croissante à respecter les tolérances pour de grandes tailles. Dans le cas des bandes utilisées pour les radars météorologiques (S, C, X et K), la sensibilité ou capacité du radar à détecter des cibles dépend en grande partie de la longueur d'onde. Elle dépend aussi du diamètre de l'antenne, du gain et de l'ouverture angulaire. Pour une antenne donnée, la détectabilité des cibles augmente en fonction inverse de la longueur d'onde: la sensibilité s'accroît de 8,87 dB en théorie et de 8,6 dB dans la pratique lorsque la longueur d'onde passe de 5 à 3 cm. Ainsi, plus la longueur d'onde est faible, plus la sensibilité est élevée. Parallèlement, plus la largeur angulaire est faible, meilleurs sont le gain et la résolution. Le gros inconvénient d'une faible longueur d'onde, c'est l'atténuation considérable du faisceau radar.

9.6.3

Atténuation

C'est en cas de pluie que l'atténuation des rayons radar est la plus importante. Elle est moindre en cas de neige ou de glace, et encore moindre si ces rayons traversent des nuages ou des gaz atmosphériques. En gros, l'atténuation en bande S est relativement faible et généralement assez peu significative. Malgré

leur coût, les radars en bande S sont essentiels pour pénétrer des cibles de très haute réflectivité dans les latitudes moyennes et subtropicales en cas de fortes tempêtes avec grêle mouillée. Pour les radars fonctionnant en bande X, l'atténuation, parfois importante à courte distance, rend difficile la mesure de l'intensité des précipitations et même la surveillance, sauf à très courte distance lorsque le masquage de précipitations éloignées par des précipitations proches n'est pas important. En bande C, l'atténuation est intermédiaire.

9.6.4 Puissance de l'émetteur

La détectabilité des cibles est directement proportionnelle à la puissance de crête de l'impulsion émise. Sur le plan pratique cependant, la puissance d'émission est limitée par la technique des tubes de puissance. Une augmentation illimitée de la puissance n'est pas le moyen le plus efficace d'accroître la détectabilité des cibles: en doublant la puissance d'émission, par exemple, on n'augmente la sensibilité du système que de 3 dB. Sur le plan technique, la puissance d'émission maximale qu'on peut atteindre augmente avec la longueur d'onde. L'augmentation de la sensibilité du récepteur et du gain de l'antenne et un choix plus judicieux de la longueur d'onde constituent sans doute de meilleurs moyens d'accroître la capacité de détection.

On emploie couramment des magnétron et des klystrons comme tubes de puissance. Les magnétrons sont moins chers, mais ils sont moins stables en fréquence. On a pensé à une époque que la stabilité des klystrons les rendait indispensables en mode Doppler. Selon une étude de Strauch (1981), l'efficacité des magnétrons est tout à fait correcte dans le cas d'applications météorologiques générales, et de nombreux radars Doppler sont actuellement équipés de magnétrons. Les techniques de suppression des léchos de sol et de détection des pixels de ciel clair militent en faveur des klystrons. D'un autre côté, les systèmes à magnétron simplifient la suppression des échos de deuxième trace.

Pour les longueurs d'onde normalement utilisées, les radars classiques devraient détecter des précipitations ayant une intensité de l'ordre de $0,1 \text{ mm h}^{-1}$ à 200 km et posséder une puissance de crête d'émission de l'ordre de 250 kW ou davantage en bande C.

9.6.5 Durée d'impulsion

La durée d'impulsion d'un radar détermine son pouvoir de résolution en portée. La résolution en portée ou capacité d'un radar à distinguer deux cibles distinctes est proportionnelle à la demi-longueur des impulsions dans l'espace. Pour la plupart des klys-

trons et des magnétrons, le rapport maximal entre largeur d'impulsion et PRF est d'environ 0,001. La durée d'impulsion se situe généralement entre 0,3 et 4 µs. Une durée d'impulsion de 2 µs donne un pouvoir de résolution de 300 m et une durée d'impulsion de 0,5 µs, un pouvoir de résolution de 75 m.

En supposant que la cible remplit complètement le volume de résolution radar, si l'on double la durée d'impulsions, on augmente la sensibilité du radar de 6 dB tout en réduisant la résolution. En raccourcissant la durée d'impulsion, on diminue la sensibilité du radar tout en augmentant sa résolution. Une durée d'impulsion plus courte permet de saisir des échantillons plus indépendants de la cible selon la distance au radar et d'accroître l'exactitude des mesures.

9.6.6 Fréquence de récurrence

La PRF doit être aussi élevée que possible pour qu'on puisse obtenir un maximum de mesures de la cible par unité de temps. La principale raison de limiter la PRF est le risque de détection indésirable d'échos de deuxième trace. La plupart des radars classiques ont une portée maximale non ambiguë supérieure à la portée utile des observations météorologiques. Un facteur important de limitation de la portée utile pour les cibles météorologiques est la hauteur considérable du faisceau au-dessus du sol, même pour une portée de 250 km.

Dans le cas des radars Doppler, on fait appel à une PRF élevée pour augmenter la vitesse Doppler maximale mesurable sans ambiguïté. Nous avons signalé ci-dessus les inconvénients d'une PRF élevée.

Le facteur PRF n'a pas d'incidence sensible sur le coût, mais il a des conséquences importantes pour les performances du système. En résumé, une PRF élevée est souhaitable pour accroître le nombre d'échantillons mesurés, la vitesse Doppler maximale mesurable sans ambiguïté et la cadence de balayage. Une faible PRF est souhaitable pour accroître la distance maximale mesurable sans ambiguïté et pour réduire le facteur de charge.

9.6.7 Antenne, largeur angulaire, vitesse et gain

Habituellement, les radars météorologiques sont équipés d'une antenne à cornet avec réflecteur parabolique pour produire un faisceau conique étroit. Il y a deux facteurs importants à considérer: l'ouverture angulaire (résolution angulaire) et le gain en puissance. Dans le cas des radars météorologiques de type courant, le diamètre de l'antenne est d'autant plus important que la longueur d'onde est élevée et que le faisceau doit être étroit.

Normalement, les radars météorologiques ont une largeur angulaire comprise entre 0,5 et 2,0°. En bande C, le réflecteur a un diamètre de 7,1 m pour un faisceau de 0,5° et de 3,6 m pour un faisceau de 1,0°. En bande S, ce diamètre est de 14,3 et 7,2 m respectivement. Le coût du système d'antenne et du socle augmente de façon exponentielle avec l'envergure du réflecteur, également limitée pour des raisons techniques. En outre, il faut choisir convenablement la tour pour qu'elle puisse supporter le poids de l'antenne.

Le choix d'un faisceau étroit afin d'obtenir une résolution maximale et d'accroître la probabilité que le faisceau contienne entièrement les cibles est particulièrement critique pour les grandes distances. Dans le cas d'un faisceau de 0,5°, l'ouverture azimutale (et verticale) du faisceau est de 0,4 km pour une distance de 50 km, de 0,9 km pour 100 km et de 1,7 km pour 200 km. Dans le cas d'un faisceau de 1,0°, cette ouverture est de 0,9, 1,7 et 3,5 km respectivement. Même pour ce type de faisceaux relativement étroits, la largeur angulaire est très élevée à grande distance.

Par ailleurs, le gain de l'antenne est inversement proportionnel à l'ouverture angulaire: plus le faisceau est étroit, plus le système est sensible proportionnellement au gain différentiel. Il faut, pour obtenir une exactitude acceptable lors de la mesure de la réflectivité et des précipitations, que la cible soit atteinte un nombre minimum de fois. C'est pourquoi la durée de passage du faisceau sur une cible doit être suffisant en mode balayage rotatif, ce qui impose une limite à la vitesse de rotation de l'antenne. On ne peut diminuer impunément la cadence de balayage. Pour que des cibles réparties puissent être mesurées correctement, les particules doivent avoir le temps de changer de position avant qu'une mesure indépendante puisse être effectuée. Les radars météorologiques ont généralement une cadence de balayage de 3 à 6 tours par minute.

La plupart des radars météorologiques sont à polarisation linéaire, le vecteur du champ électrique émis ayant une direction soit horizontale soit verticale. Il n'est pas évident de choisir la meilleure de ces directions, mais dans la majorité des cas, la polarisation est horizontale. Une polarisation horizontale a certains avantages: a) échos de mer et du sol moindres qu'à la verticale; b) lobes secondaires moins développés, ce qui permet des mesures plus précises dans le plan vertical; c) plus grande rétrodiffusion de la pluie en raison de la forme elliptique des gouttes qui tombent. Cependant, pour un faible angle de site, la meilleure réflexion des ondes à polarisation horizontale par un sol plan risque de produire un effet indésirable dépendant de la distance.

En résumé, l'étroitesse du faisceau influe sur la sensibilité, la détectabilité, la résolution horizontale et verticale, la portée utile et l'exactitude du système. Le principal inconvénient d'une faible largeur angulaire est son coût. Pour toutes ces raisons, plus on peut réduire la largeur angulaire à un prix abordable, plus un radar a d'utilité (Crozier *et al.*, 1991).

9.6.8 Caractéristiques des radars météorologiques de type courant

On trouvera au tableau 9.7 les caractéristiques des radars couramment utilisés pour des applications météorologiques générales.

Comme nous l'avons vu, les caractéristiques et les paramètres d'un radar sont interdépendants. Les limites techniques imposées aux éléments des radars et la disponibilité d'éléments fabriqués en série sont des considérations importantes lors de la conception d'un système radar.

Les radars de type «Z uniquement» sont les radars classiques non cohérents à impulsion utilisés depuis plusieurs dizaines d'années et encore fort utiles. Les radars Doppler constituent une nouvelle génération de radars qui élargissent les possibilités d'observation. Ils permettent notamment de mesurer la vitesse radiale. Les radars «micro-Doppler», conçus de façon à améliorer la détection de microrafales et de tornades à petite échelle sur des zones extrêmement limitées, servent par exemple à la protection des aéroports.

9.7 INSTALLATION D'UN RADAR

9.7.1 Choix d'un site

Le choix d'un site pour l'installation d'un radar météorologique dépend de l'usage prévu de l'appareil. Lorsqu'il existe une zone délimitée où des précipitations sont à détecter, le meilleur compromis consiste généralement à situer le matériel à une distance de 20 à 50 km de la zone considérée, généralement face au vent par rapport à la trajectoire principale des précipitations. Il est conseillé d'installer le radar légèrement en dehors de cette trajectoire pour éviter tout problème de mesure lorsque les précipitations passent au-dessus du radar. Il devrait ainsi être possible d'obtenir une bonne résolution sur la zone à surveiller et de prévoir plus tôt les précipitations à venir (Leone *et al.*, 1989).

Dans le cas d'un réseau de radars devant avoir essentiellement des applications synoptiques, les appareils à installer aux latitudes moyennes devraient

Tableau 9.7. Caractéristiques des radars météorologiques de type courant

Type	Z uniquement	Doppler	Z uniquement	Doppler	Micro-Doppler
Bandé	C	C	S	S	C
Fréquence (GHz)	5,6	5,6	3,0	2,8	5,6
Longueur d'onde (cm)	5,33	5,33	10,0	10,7	5,4
Puissance de l'impulsion émise (kw)	250	250	500	1 000	250
Durée d'impulsion (s)	2,0	0,5 - 2,0	0,25 - 4,0	1,57 - 4,5	1,1
Fréquence de récurrence (PRF en Hz)	250 - 300	250 - 1 200	200 - 800	300 - 1 400	235 - 2 000
Récepteur	Log	Log/Lin	Log	Log/Lin	Log/Lin
Signal minimum détectable (dBm)	- 105	- 105	- 110	- 113	- 106
Diamètre de l'antenne (m)	3,7	6,2	3,7	8,6	7,6
Largeur angulaire du faisceau principal (degrés)	1,1	0,6	1,8	1,0	0,5
Gain (dB)	44	48	38,5	45	51
Polarisation	H	H	H	H	H
Vitesse de rotation (tr/min)	6	1 - 6	3	6	5

être situés à une distance d'environ 150 à 200 km les uns des autres. Cet intervalle peut être augmenté plus près de l'équateur si les échos radar à obtenir doivent atteindre fréquemment de grandes altitudes. Dans tous les cas, les radars à faisceau étroit sont ceux qui offrent la meilleure exactitude pour la mesure des précipitations.

Le choix du site d'un radar dépend de nombreux facteurs économiques et techniques :

- a) Existence de routes pour accéder au site ;
- b) Disponibilité de lignes électriques et de liaisons de télécommunication. Il est souvent nécessaire d'installer des dispositifs de protection contre la foudre vendus dans le commerce ;
- c) Prix du terrain ;
- d) Proximité d'un service de contrôle et d'entretien ;
- e) Les obstacles susceptibles de s'opposer au passage des faisceaux sont à éviter. Il ne doit exister aucun obstacle présentant une élévation angulaire par rapport à l'horizontale supérieure à une demi-largeur du faisceau ou ayant une largeur horizontale supérieure à une demi-largeur du faisceau ;
- f) Les échos de sol sont à éviter autant que possible. Pour un radar devant détecter des cibles

à relativement courte distance, il est parfois possible de trouver, à la suite d'une inspection minutieuse de la région d'implantation et d'une étude détaillée des cartes topographiques, une zone relativement plate située dans une dépression peu profonde, dont les bords feront naturellement obstacle aux échos de sol générés par les lobes secondaires tout en gênant aussi peu que possible le faisceau principal. Dans le cadre de l'étude du site, il faudrait toujours vérifier la présence d'obstacles éventuels au moyen d'une caméra et d'un théodolite. Dans certains cas, il sera utile de faire appel à un radar mobile pour confirmer si le site est approprié. Le matériel et le logiciel dont sont équipés certains radars modernes permettent de supprimer en grande partie les échos de sol en rejetant un minimum d'échos météorologiques (Heiss, McGrew et Sirmans, 1990) ;

g) Un radar devant effectuer une surveillance à grande distance, comme dans le cas des cyclones tropicaux ou de certaines applications côtières, sera généralement installé au sommet d'une colline. Les échos de sol sera généralement important, ce qui n'est pas très grave pour une longue portée (voir l'élimination des échos de sol à la section 9.2.6) ;

- h) Les parcs d'éoliennes situés à proximité d'un radar météorologique risquent de nuire de diverses façons aux performances de ce radar. Il ne faut donc pas installer de radars à proximité de tels parcs. On trouvera à l'annexe 9.A un exposé plus détaillé de cette question nouvelle ainsi que des principes directeurs sur la façon de réduire au minimum l'impact des éoliennes sur les radars météorologiques ;
- i) Dans toute étude de site, il faudrait vérifier soigneusement la présence de parasites électromagnétiques pour éviter autant que possible une interférence avec d'autres types de transmissions tels que signaux de télévision, liaisons hertziennes ou autres radars. Il faudrait également obtenir confirmation de l'absence de risques dus au rayonnement dans les hyperfréquences pour la santé des populations vivant à proximité du site proposé (Skolnik, 1970 ; Leone et al., 1989).

9.7.2 Télécommunications et transmission de données radar

Des progrès récents des télécommunications et de la technique informatique permettent la transmission de données radar à un grand nombre de postes distants. Il existe notamment des systèmes informatiques capables d'assimiler les données provenant d'un grand nombre de radars ainsi que d'autres sources de données telles que les satellites. Il est également possible de contrôler à distance et de télécommander un radar, ce qui permet d'en assurer l'exploitation automatique. Grâce à ces progrès techniques, les prévisions immédiates sont désormais effectuées, dans de nombreux pays, à des endroits éloignés des stations radar.

La transmission d'images peut être effectuée par presque tout moyen de transmission moderne: lignes téléphoniques (spécialisées ou non), liaisons par fibres optiques, liaisons radio ou hertziennes ou voies de communication par satellite. Les moyens de transmission les plus largement employés sont des lignes téléphoniques spécialisées, en raison de leur disponibilité et de leur coût relativement faible dans de nombreux pays. Rappelons que les radars sont souvent situés à des endroits reculés où il n'existe pas de réseau de télécommunications moderne.

On peut désormais transmettre des images radar en quelques secondes grâce aux progrès rapides des techniques de communication. Par exemple, un produit d'une portée de 100 km et d'une résolution de 0,5 km peut exiger un volume de fichier de 160 Ko. En utilisant un algorithme de compression, on peut réduire ce volume à 20 ou 30 Ko en format GIF. Un tel fichier peut être transmis sur une ligne

téléphonique analogique en moins de 30 secondes, alors qu'avec un circuit RNIS de 64 Kb/s, cela peut prendre que 4 secondes. Cependant, la transmission d'un plus grand nombre de niveaux de réflectivité ou d'autres données telles que le balayage volumétrique de la réflectivité ou de données Doppler augmente la durée des transmissions.

9.8 ÉTALONNAGE ET ENTRETIEN

Il convient de suivre les instructions du fabricant pour l'étalonnage et l'entretien de tout radar. Voici un aperçu de ces deux opérations.

9.8.1 Étalonnage

Dans des conditions idéales, on peut faire appel, pour l'étalonnage complet de la réflectivité, à une cible extérieure telle qu'une sphère métallisée dont la réflectivité radar est connue. Le principe consiste à vérifier si les caractéristiques nominales de l'antenne et du guide d'ondes sont correctes. Cependant, cette méthode est très rarement utilisée en raison des difficultés pratiques à mettre une sphère en altitude dans l'atmosphère et des multiples réflexions du sol. On peut aussi vérifier les paramètres d'une antenne en mesurant le flux solaire. Les opérations courantes d'étalonnage ne portent pas sur l'antenne, mais uniquement sur le guide d'ondes et l'ensemble émetteur-récepteur. Habituellement, les opérations suivantes sont prescrites :

- a) Mesure de la puissance d'émission et de la forme d'onde dans la bande de fréquence considérée ;
- b) Contrôle de la fréquence d'émission et du spectre des fréquences ;
- c) Injection d'un signal hyperfréquence connu en amont de l'étage récepteur afin de vérifier si les niveaux de réflectivité indiqués par le radar correspondent bien à la puissance en entrée ;
- d) Mesure du rapport signal/bruit, qui devrait se situer dans les limites nominales d'utilisation indiquées dans les caractéristiques du radar.

Si l'un ou plusieurs des contrôles ci-dessus laissent apparaître des changements ou des erreurs systématiques, des mesures correctives doivent être prises. L'étalonnage Doppler inclut le contrôle et l'ajustement de la stabilité de phase au moyen de cibles fixes ou de signaux artificiels, ainsi que l'évaluation des parties réelles et imaginaires du signal vidéo, et le test du module de traitement du signal à partir de signaux artificiels prédefinis.

Le meilleur moyen de contrôler le pointage et l'angle de site est de déterminer la position du soleil en

mode réception uniquement puis d'utiliser les informations disponibles sur cette position, faute de quoi il faut disposer d'indicateurs de niveau mécaniques sur l'antenne. La présence ou l'absence d'échos en provenance de cibles terrestres fixes peut également servir à vérifier approximativement les performances de l'émetteur et du récepteur.

Bien que les radars modernes soient équipés de composants électroniques très stables, il convient d'étalonner ces éléments avec une fréquence suffisante à garantir la fiabilité et l'exactitude des données obtenues. L'étalonnage doit être effectué soit par des personnes compétentes soit au moyen de techniques automatiques telles que les diagnostics en direct et d'appareils de contrôle. Dans le premier cas, qui exige une intervention humaine, l'étalonnage devrait être réalisé au moins une fois par semaine. Dans le deuxième, il peut être réalisé quotidiennement ou de façon semi-continue. Des contrôles simples par comparaison du niveau et de la position d'un écho peuvent être effectués fréquemment au moyen de deux ou plusieurs radars travaillant en recouvrement, pointés sur une cible appropriée.

9.8.2 **Entretien**

Un radar moderne, s'il est correctement installé et exploité, devrait rarement tomber en panne. Certains fabricants prétendent à une moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) de l'ordre d'un an. Cependant, de telles affirmations sont souvent optimistes et il faut, pour atteindre une telle moyenne, procéder à un entretien préventif systématique. Des opérations d'entretien courant et un personnel technique suffisant sont nécessaires pour réduire le temps de réparation au minimum.

L'entretien préventif devrait inclure au moins un contrôle mensuel de l'ensemble des pièces susceptibles d'usure, telles qu'engrenages, moteurs, ventilateurs et infrastructure. Les résultats de ces contrôles devraient être portés sur le livret de contrôle du radar par le personnel local préposé à l'entretien et, le cas échéant, être communiqués au service central de l'entretien. S'il y a plusieurs radars à entretenir, il peut y avoir un service centralisé d'appui logistique plus un atelier de réparation. Ce dernier prend livraison des pièces défectueuses des radars, les répare et les remet au service logistique, qui les stocke comme pièces de rechange à utiliser selon les besoins.

Pour assurer le dépannage, le service devrait disposer :

- De pièces de rechange pour les éléments les plus importants : tubes, composants à semi-conducteurs, cartes, châssis, moteurs, engrenages, blocs d'alimentation, etc. L'expérience indique

qu'il est souhaitable d'affecter 30 % de l'investissement initial dans un radar aux pièces de rechange essentielles à stocker sur site. S'il y a plusieurs radars, ce pourcentage peut être réduit jusqu'à 20 % environ, avec une répartition correcte des pièces entre le service central et les sites ;

- D'appareils de contrôle comprenant le matériel d'étalonnage cité ci-dessus ; en général, cette rubrique correspond à 15 % environ de la valeur d'un radar ;
- D'un personnel bien formé, capable de cerner les problèmes et de procéder à des réparations de façon rapide et efficace.

Grâce à une bonne organisation du service d'entretien, avec un matériel standard, un radar devrait rester en service 96 % du temps en moyenne annuelle. Les performances peuvent être améliorées pour un prix plus élevé.

Il est conseillé de disposer au moins du matériel suivant pour l'étalonnage et l'entretien :

- Un générateur de signaux hyperfréquence ;
- Un wattmètre hyperfréquence ;
- Un oscilloscope MHz ;
- Un fréquencemètre hyperfréquence ;
- Des cornets à gain normalisés ;
- Un générateur de signaux infrarouge ;
- Des éléments hyperfréquence: circuits de charge, coupleurs, atténuateurs, connecteurs, câbles, adaptateurs, etc. ;
- Un analyseur polyvalent de spectre d'hyperfréquences, conservé par le service central ;
- L'outillage et le matériel courants utilisés en électricité et en mécanique.

9.9 **MESURE DES PRÉCIPITATIONS**

La mesure des précipitations par radar suscite l'intérêt depuis le tout début de la météorologie radar. L'avantage le plus notable de l'emploi de radars pour la mesure des précipitations est la couverture en temps réel, à partir d'un seul point d'observation, d'une vaste zone avec une haute résolution spatio-temporelle. De plus, on peut étendre l'image bidimensionnelle de la situation météorologique à une zone très importante en réunissant les données émanant de plusieurs radars. Cependant, ce n'est que récemment qu'on a pu effectuer des mesures sur une zone étendue avec une exactitude suffisante pour des applications hydrologiques.

Il est malheureusement impossible d'estimer précisément l'exactitude des mesures du fait notamment qu'il n'existe aucune base absolument fiable

de comparaison. Une technique couramment employée consiste à comparer les données recueillies par radar à des mesures effectuées sur un réseau de pluviomètres de référence. Cette technique, intéressante a priori, souffre d'une limitation fondamentale: on ne dispose d'aucun étalon de référence pour établir l'exactitude de la quantité de pluie surfacique mesurée par un réseau de pluviomètres à l'échelle du faisceau radar. Il n'existe pas dans la nature de précipitation homogène et standard qui permette de tester le réseau et il n'y a pas non plus de norme plus élevée à laquelle confronter les données pluviométriques. On ne connaît donc ni la quantité réelle de précipitations dans une zone donnée ni la précision du réseau. Certains éléments portent à croire que l'exactitude des données pluviométriques est nettement inférieure, dans certains cas, à ce qu'on pense généralement, surtout si ces données proviennent d'un nombre relativement faible de pluviomètres (Neff, 1977).

9.9.1 Caractéristiques des précipitations influant sur les mesures radar : la relation Z-R

Les précipitations sont estimées habituellement au moyen de la relation Z-R :

$$Z = A R^b \quad (9.10)$$

où A et b sont des constantes. Cette relation n'est pas la seule qui existe: de multiples rapports empiriques ont été établis pour divers climats, zones ou types de précipitations. Les valeurs nominales et caractéristiques des constantes sont $A = 200$ et $b = 1,60$ (Marshall and Palmer, 1948 ; Marshall and Gunn, 1952).

L'équation est développée en fonction d'un certain nombre d'hypothèses qui ne sont pas nécessairement valables à 100 % dans tous les cas. Néanmoins, les travaux réalisés et l'expérience indiquent que dans la plupart des cas, ce rapport donne une bonne indication des précipitations au niveau du sol, sauf en cas d'anomalies flagrantes. On peut faire état de certaines généralités. Pour une longueur d'onde de 5 ou 10 cm, l'approximation de Rayleigh est valable pour la plupart des applications, sauf en présence de grêlons. Une grande concentration de glace mêlée à de l'eau peut provoquer des anomalies, surtout à proximité du niveau de fusion. Si l'on tient compte de l'indice de réfraction de la glace ($|K|^2 = 0,208$) et que l'on choisisse un rapport correct entre la réflectivité et l'intensité des précipitations (Z_e par rapport à R), on peut évaluer la quantité de précipitations de façon suffisamment précise en cas de neige. (On prend un indice de 0,208 au lieu de 0,197 pour la glace afin de tenir compte du changement de dia-

mètre des particules pour des particules d'eau et de glace de même masse.)

L'intensité R des précipitations résulte de la quantité et de la vitesse de chute des particules dans le volume de résolution radar. Elle est globalement proportionnelle à la puissance quatre du diamètre des particules. Il n'existe ainsi pas de rapport fixe entre la réflectivité radar et l'intensité des précipitations, car ce rapport dépend de la répartition granulométrique des particules. C'est pourquoi la variabilité naturelle de cette répartition est une source importante d'incertitude lors de la mesure des précipitations par radar.

Les relations empiriques Z-R et leurs variations d'un événement pluvieux à l'autre ou à l'intérieur d'un même événement font l'objet de nombreuses études depuis une quarantaine d'années. On peut obtenir une relation Z-R en calculant les valeurs de Z et de R à partir de la répartition granulométrique mesurée des gouttes. Une autre solution consiste à comparer la valeur de Z mesurée en altitude par un radar (on l'appelle alors «réflectivité radar équivalente» et on la désigne par Z_e) avec la valeur de R mesurée au sol. Cette technique consiste à intégrer toute différence existant entre l'intensité des précipitations en altitude et l'intensité de celles qui atteignent le sol. Comme elle peut aussi répercuter des erreurs d'étalonnage du radar, le résultat n'est pas strictement une relation rapport Z-R.

On s'est beaucoup penché sur la possibilité de tenir compte d'une partie de la variabilité des relations Z-R en stratifiant les événements pluvieux selon le type de précipitation (convective, non cellulaire, orographique). Les améliorations obtenues sont modestes et l'on doute toujours de l'intérêt d'appliquer cette technique dans un cadre opérationnel. Les variations de la répartition granulométrique des gouttes sont assurément importantes, mais leur importance relative est souvent surestimée. Si l'on établit des moyennes dans le temps et/ou dans l'espace, on constate que les erreurs liées à ces variations dépassent rarement un facteur de deux pour l'intensité des précipitations. À faible distance, ces erreurs constituent la principale source de variation dans le cadre d'expériences bien définies. À plus grande distance, cependant, les erreurs dues à l'incapacité d'observer les précipitations à proximité du sol et au remplissage du faisceau sont généralement prédominantes. On tient cependant très peu compte de ces erreurs malgré leur importance.

En raison de l'amplification ou de l'évaporation des précipitations, des mouvements atmosphériques et du changement de phase (glace et eau dans la cou-

che de fusion ou bande brillante), on observe des profils verticaux de réflectivité très variables, tant à l'intérieur d'un même événement pluvieux que d'un événement à l'autre. À moins que la largeur angulaire du faisceau soit très faible, on obtient ainsi une répartition non uniforme de la réflectivité dans le volume échantillonné par le radar. L'expérience indique que le profil vertical pose moins de problèmes en cas de pluie convectives.

Cependant, en cas de pluie ou de neige stratiforme, ce profil vertical prend davantage d'importance. Avec la distance, le faisceau s'élargit et prend de l'altitude. C'est pourquoi la différence entre les précipitations estimées par radar et les précipitations mesurées au sol augmente également. En général, la réflectivité diminue avec l'altitude, d'où une sous-estimation des précipitations mesurées par radar en cas de précipitations stratiformes ou neigeuses.

À grande distance, en cas de précipitations de faible altitude, cette sous-estimation risque d'être considérable, surtout si le faisceau est occulté par des obstacles tels que des montagnes pour un faible angle de site. Les erreurs de ce type ont souvent tendance à prédominer sur toutes les autres. On peut facilement les laisser passer lorsqu'on observe des perturbations à faible distance uniquement ou lorsqu'on analyse des perturbations toutes situées à peu près à la même distance du radar.

On trouvera chez Joss et Waldvogel (1990), Smith (1990) et Sauvageot (1994) un aperçu de ces questions et d'autres également: choix de la longueur d'onde, erreurs dues à l'atténuation, éléments à considérer lors du choix d'un site pour un radar destiné à des applications hydrologiques, étalonnage du matériel dans un système radar, échantillonnage et calcul de moyennes, ajustement météorologique des données obtenues par radar. Nous ne considérons ci-après que les mesures concernant la pluie. On sait peu de choses, sur le plan opérationnel, des mesures radar concernant la neige; on en sait encore moins des mesures concernant la grêle.

9.9.2 Procédés de mesure

Dans le cas d'applications hydrologiques, il faut faire appel à un procédé de base comportant les étapes suivantes pour calculer l'intensité de la pluie à partir de la réflectivité mesurée par radar :

- a) Garantie de la stabilité du matériel grâce à l'étalonnage et à l'entretien de celui-ci ;
- b) Correction des erreurs dues au profil vertical de réflectivité ;
- c) Prise en compte de toutes les données concernant le rapport Z_e - R et calcul de l'intensité de la pluie ;

- d) Ajustement des résultats en fonction des données pluviométriques.

Les trois premières étapes reposent sur des facteurs physiques connus alors que la dernière fait appel à une approche statistique pour compenser les erreurs résiduelles, ce qui accroît l'efficacité des méthodes statistiques employées. Par le passé, les résultats obtenus lors de ces étapes étaient considérablement limités par les circuits analogiques et les techniques photographiques servant à l'enregistrement et à l'analyse des données. Les corrections à apporter étaient très difficiles à déterminer et à appliquer, et cela ne se faisait pas en temps réel. Aujourd'hui, les données peuvent être recueillies en trois dimensions, sous une forme pratique, et l'on dispose de la puissance de calcul nécessaire pour accomplir ces tâches. Les recherches actuelles visent en grande partie à élaborer des techniques pour le faire dans un cadre opérationnel (Ahnert *et al.*, 1983).

Les méthodes employées pour les étapes b) et d) ci-dessus et la valeur des résultats obtenus à partir de la mesure des précipitations par radar dépendent en grande partie des circonstances: objectif visé, zone géographique considérée, détails de l'application et autres facteurs. Dans certains cas, un processus interactif est souhaitable, comme celui mis au point pour FRONTIERS (voir l'appendice A de l'ouvrage de Joss et Waldvogel (1990)). Un tel procédé fait appel à toutes les données pertinentes recueillies dans les centres modernes d'acquisition météorologique.

À ce jour, aucune technique de compensation en temps réel des effets du profil vertical de la réflectivité (étape (b)) ne fait l'unanimité. Nous pouvons néanmoins en citer trois :

- a) Corrections selon la distance : l'effet du profil vertical est associé à l'altitude croissante de l'axe du faisceau et à son élargissement avec la distance. On peut ainsi faire intervenir un facteur climatologique moyen dépendant de la distance pour apporter une première correction. Les facteurs seront différents selon la catégorie des précipitations: convectives ou stratiformes, par exemple ;
- b) Corrections variables dans l'espace : des corrections variant selon le gisement et la distance peuvent être utiles si les caractéristiques des précipitations changent systématiquement dans la zone considérée ou si la couverture radar n'est pas uniforme en raison de la topographie ou d'obstacles locaux. Si les informations de base sont suffisantes, on peut introduire des facteurs moyens de correction dans des tables de correction appropriées. Sinon, il faut déduire les corrections à apporter des données sur la réflectivité proprement dites ou d'une

- comparaison avec les données pluviométriques (opération difficile à réaliser dans les deux cas) ;
- c) Profil vertical complet: le profil vertical dans les précipitations varie selon l'endroit et le moment, et le niveau le plus bas visible à partir d'un radar varie généralement en raison de l'irrégularité de l'horizon radar. Par conséquent, un processus de correction point par point faisant appel à un profil vertical représentatif pour chaque zone considérée est parfois nécessaire afin d'obtenir des résultats optimaux. Des profils représentatifs peuvent être obtenus à partir des données du balayage volumétrique d'un radar elle-mêmes, de compilations climatologiques ou de modèles de précipitations. Cette technique est la plus complexe, mais elle peut être appliquée grâce aux systèmes de traitement de données actuels (Joss et Lee, 1993).

Après avoir appliqué les corrections nécessaires liées au profil de réflectivité, il faut utiliser une relation entre la réflectivité et l'intensité des précipitations correspondant à la situation, aux conditions géographiques et à la saison, pour estimer la valeur de R (voir (c) dans le premier paragraphe de la présente section). On s'accorde généralement pour dire qu'il faut effectuer régulièrement des comparaisons avec les données pluviométriques afin de contrôler les performances des radars, et qu'il faut apporter les corrections voulues si des erreurs systématiques apparaissent clairement (étape (d)). Si les résultats obtenus par un radar sont nettement erronés en raison d'un problème d'étalonnage ou autre, de telles corrections peuvent conduire à des améliorations sensibles.

Cependant, ces corrections n'assurent pas automatiquement une amélioration des mesures effectuées par radar : les résultats corrigés sont parfois même plus mauvais que ceux d'origine. Il en va ainsi notamment dans le cas de pluies de convection où le développement vertical des échos réduit les difficultés liées au profil vertical et où les données pluviométriques sont suspectes en raison d'un échantillonnage non représentatif. En outre, la distance de décorrélation spatiale est parfois faible et la comparaison pluviomètres-radar devient de plus en plus inexacte avec la distance au pluviomètre. On peut adopter une règle générale selon laquelle les corrections n'apportent d'améliorations sensibles que si la différence systématique (c'est-à-dire le biais systématique) existant entre l'intensité des précipitations mesurée par radar et celle mesurée par des pluviomètres est plus grande que l'écart type de la dispersion aléatoire entre mesures pluviométriques et radar. Cette règle, qui permet de déterminer s'il convient

d'utiliser des données pluviométriques pour procéder à des corrections, nous incite à contrôler les données disponibles avant d'apporter quelque correction que ce soit. Diverses techniques ont été étudiées à cet égard, mais aucune ne fait l'unanimité jusqu'à présent.

Plusieurs techniques faisant appel à des radars à diversité de polarisation pour améliorer la mesure de l'intensité des précipitations ont été proposées. On a supposé notamment que la différence entre la réflectivité mesurée pour une polarisation horizontale et verticale (Z_{DR}) pourrait donner des indications utiles sur la répartition granulométrique des gouttes (Seliga et Bringi, 1976). Une autre technique consiste à faire intervenir K_{DP} , qui dépend de la déformation de l'onde émise due à de grands sphéroïdes aplatis. Cette technique dépend de la distorsion hydrodynamique subie par les grosses gouttes et de l'intensification de la pluie avec l'augmentation de la taille des gouttes, qui donne une signature de polarisation plus nette. La polémique est toujours vive, cependant, quant à savoir si cette technique est prometteuse pour la mesure des précipitations dans un cadre opérationnel (English *et al.*, 1991).

À faible distance (pour une résolution spatiale élevée), les radars à diversité de polarisation sont susceptibles d'offrir des informations précieuses sur la répartition des particules et d'autres paramètres dépendant de la physique des nuages. À plus grande distance, on ne peut être sûr que le faisceau radar est rempli d'hydrométéores répartis de façon homogène, ce qui rend plus incertain la relation empirique établie entre la signature polarimétrique et la répartition granulométrique des gouttes. Bien évidemment, le fait de mieux connaître la relation $Z-R$ sera utile, mais même si des techniques à paramètres multiples étaient parfaitement au point, l'erreur imputable à cette relation ne passerait que de 33 % à 17 %, comme l'ont indiqué Ulbrich et Atlas (1984). Pour des applications hydrologiques à faible distance, la correction des autres erreurs systématiques (que nous avons abordées ci-dessus) est généralement plus importante, d'un facteur 10 ou parfois davantage.

9.9.3 État actuel des connaissances et résumé

Depuis des années, de nombreuses recherches sont consacrées à l'étude des possibilités du radar pour la mesure des précipitations. En général, la mesure de la pluie par radar, déduite d'une relation empirique $Z-R$, correspond bien à sa mesure par des pluviomètres à proximité du radar. À plus grande distance, la variabilité et la sous-évaluation des mesures radar

augmentent. En Suisse, par exemple, à une distance moyenne de 100 km, les radars ne mesurent que 25 % de la quantité de pluie mesurée par des pluviomètres, alors qu'ils mesurent l'intégralité de celle-ci à faible distance.

On observe des variations semblables mais moins importantes en terrain plat et en cas de pluies de convection. Les raisons de ces erreurs sont la sphéricité de la Terre, des obstacles topographiques et l'élargissement du faisceau radar avec la distance. Ainsi, le principal inconvénient de l'utilisation du radar pour la mesure des précipitations et pour des applications hydrologiques dans un cadre opérationnel est l'impossibilité de mesurer les précipitations suffisamment près du sol à la distance voulue. Comme ce problème se pose rarement dans le cadre d'expériences bien définies, il n'a pas reçu l'attention qu'il méritait en tant que principal problème pour des applications opérationnelles.

L'existence d'un matériel peu coûteux de traitement rapide des données permet désormais d'établir la répartition tridimensionnelle des échos dans toute la zone de couverture d'un radar. Si l'on ajoute à cela la connaissance de la position du radar et des reliefs qui l'entourent, on peut corriger en temps réel une grande partie des difficultés dues au profil vertical, ou du moins en évaluer l'importance. Il est ainsi possible d'étendre la zone où l'exactitude des mesures est acceptable pour de nombreuses applications hydrologiques.

Pour exploiter au mieux les possibilités d'un radar, il est conseillé de suivre les règles suivantes :

- Il faut choisir le site du radar de façon à pouvoir observer les précipitations aussi près du sol que possible. Cela implique qu'il ne doit pas y avoir d'effet d'écran ou d'échos de sol ou alors qu'il doit être possible d'éliminer l'influence des échos de sol, par exemple par analyse Doppler. Pour les mesures quantitatives, de telles conditions limitent fréquemment la portée utile d'un radar à des distances de 50 à 100 km ;
- Il faut choisir la longueur d'onde et le diamètre de l'antenne de façon à obtenir un compromis acceptable entre l'atténuation due aux précipitations et la qualité de la résolution spatiale. Pour une grande distance, il faudra peut-être faire appel à une longueur d'onde plus faible afin d'obtenir un faisceau suffisamment étroit ou à une antenne de plus grand diamètre si l'emploi de la bande S est nécessaire, en raison de l'atténuation fréquemment provoquée par de grosses cellules de forte intensité ;
- Le système doit être rigoureusement entretenu et soumis à un contrôle qualité, notamment

par vérification de la stabilité et de l'étalonnage du matériel ;

- À moins qu'elles soient effectuées juste au-dessus du sol, les mesures de la réflectivité doivent être corrigées pour tenir compte des erreurs ayant pour origine le profil vertical de la réflectivité. Comme ce profil fluctue avec le temps, il doit être contrôlé constamment par le radar. Il peut s'avérer nécessaire de calculer la correction pour chaque pixel, car celle-ci dépend de la hauteur minimale du volume de résolution radar visible au-dessus du sol. Il est important d'apporter la correction voulue au profil vertical avant toute autre opération, car il s'agit de la principale correction à grande distance ;
- La taille de l'échantillon doit être correcte pour l'application considérée. Pour les applications hydrologiques, et notamment lorsqu'on corrige les données radar en fonction des mesures effectuées par pluviomètre, il est souhaitable d'intégrer les données obtenues sur un certain nombre d'heures et/ou de kilomètres carrés. L'intégration doit être effectuée sur la quantité voulue (intensité linéaire R de la pluie) pour éviter toute erreur systématique liée à l'intégration.

Même une évaluation approximative du profil vertical réel de la réflectivité peut apporter une amélioration sensible. Des mesures polarimétriques peuvent également apporter une amélioration, mais il reste à prouver que le supplément de coût, la complexité et le risque d'interprétation erronée des mesures de polarisation se justifient dans le cas d'applications hydrologiques dans un cadre opérationnel.

Les principaux avantages du radar sont sa haute résolution spatio-temporelle, sa vaste couverture spatiale et l'instantanéité de l'information (données en temps réel). Le radar a la possibilité d'observer des zones inaccessibles telles que des lacs et de suivre une «cible flottante» ou un «complexe convectif» en temps réel, par exemple en vue de prévisions à courte échéance. Bien que le radar soit moins bien adapté à la mesure de quantités de pluie avec une exactitude absolue, certains réseaux radar donnent déjà des informations quantitatives de bonne qualité à de nombreux endroits. Il est peu probable que le radar remplace un jour entièrement les pluviomètres, car ceux-ci fournissent d'autres renseignements et sont essentiels pour la correction et/ou le contrôle des indications obtenues par radar. D'un autre côté, comme le font valoir de nombreux spécialistes, il faudrait un réseau extrêmement dense et coûteux de pluviomètres pour obtenir une résolution comparable à celle qu'on atteint facilement avec un radar.

9.9.4 **Technique d'intégration superficie-temps**

Dans le cas des applications climatologiques qui ne nécessitent pas de données en temps réel, on peut tirer profit du rapport étroit existant entre la quantité totale de pluie d'une part et l'étendue et la durée des averses d'autre part (Byers, 1948; Leber, Merritt et Robertson, 1961). Sans faire appel à une relation $Z-R$, Doneaud *et al.* (1984 et 1987) ont établi un rapport linéaire entre la superficie de la zone arrosée et la pluviosité totale dans cette zone, avec une très faible dispersion. Cette relation dépend du seuil choisi pour définir la zone de pluie. Malgré des possibilités d'utilisation limitées pour des applications de prévision à courte échéance en temps réel, cette relation a une réelle valeur dans le cas des études et des applications climatologiques.

9.10 **DÉTECTION DE PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES ET APPLICATION AUX PRÉVISIONS IMMÉDIATES**

9.10.1 **Utilisation des données de réflectivité**

Actuellement, le critère le plus couramment utilisé pour la détection par radar d'orages potentiellement violents est le niveau de réflectivité. Il est conseillé aux météorologues des services d'exploitation de rechercher des zones de haute réflectivité (égale ou supérieure à 50 dBZ), et notamment les bandes spirales et les nuages orageux qui caractérisent les cyclones tropicaux. Des échos en forme de crochet ou de doigt, des échos en saillie et d'autres types d'échos obtenus à partir de balayages volumiques permettent de prévoir des tornades ou des orages violents (voir Lemon, Burgess et Brown, 1978), mais les fausses alertes sont nombreuses.

On a réussi récemment à améliorer la détection des orages violents en traitant les données numériques sur la réflectivité obtenues par balayage volumique automatique avec une fréquence de mise à jour de 5 à 10 minutes. Des mesures massiques de réflectivité telles que celles obtenues par les techniques de la lame d'eau intégrée verticalement et la probabilité de conditions météorologiques extrêmes ont également permis d'améliorer la détection et la prévision d'orages violents et notamment de tempêtes de grêle.

De nombreuses techniques ont été proposées pour identifier la grêle au moyen de radars ayant une longueur d'onde de 10 cm, par exemple par la présence

d'un écho de 50 dBZ à une altitude de 3 ou 8 km (Dennis, Schock et Koscielski, 1970 ; Lemon, Burgess et Brown, 1978). Cependant, des études de contrôle n'ont pas encore été signalées dans d'autres régions du monde. Federer *et al.* (1978) ont constaté que l'altitude de l'isohypse 45 dBZ doit être supérieure d'au moins 1,4 km à l'altitude zéro degré pour que la présence de grêle soit probable. Un prolongement de cette méthode, vérifié par l'Institut météorologique royal néerlandais, est utilisé sur le plan opérationnel (Holleman *et al.*, 2000; Holleman, 2001). Une autre technique pour améliorer la détection de la grêle consiste à faire appel à des radars ayant deux longueurs d'onde différentes, généralement en bande X et en bande S (Eccles et Atlas, 1973). L'explication physique de ce que les radars distinguent pour de telles longueurs d'onde est essentielle pour comprendre les points forts et les limites de ces techniques (évolution des hydrométéores en coupe et répartition de l'intensité). Des études de la diversité de polarisation laissent présager une amélioration de la détection de la grêle et de la mesure des fortes pluies fondées sur la réflectivité différentielle (Z_{DR}) mesurée par un radar Doppler à double polarisation (Seliga et Bringi, 1976).

Depuis la fin des années 70, on fait appel à des systèmes informatiques pour enregistrer par intermittence et zoomer les données radar. Le système britannique FRONTIERS (Browning et Collier, 1982; Collier, 1989), le système japonais AmeDAS, le système français ARAMIS (Commission des communautés européennes, 1989) et le système américain PROFS sont interactifs et permettent à l'utilisateur d'obtenir des images chrominance composite provenant de plusieurs radars à la fois et de mixer les données radar avec d'autres types d'informations.

La synthèse de données radar et de données émanant de pluviomètres donne un produit puissant de prévision immédiate pour le contrôle des pluies. La «Radar-AmeDAS Precipitation Analysis» est l'un des produits existants au Japon (Makihara, 2000). L'intensité de l'écho obtenue d'un réseau de radars est transformée en intensité de précipitations au moyen d'une relation Z_e-R et le cumul de précipitations en une heure est estimé à partir de cette intensité. L'estimation de cumul horaire est ensuite étalonnée à partir de cumuls horaires de mesures pluviométriques pour donner une carte très précise du cumul de précipitations en une heure.

9.10.2 **Utilisation des données Doppler**

Le meilleur moyen de mesurer les vents dans les précipitations est la méthode Doppler multiple, utilisée depuis le milieu des années 70 dans le contexte de programmes scientifiques sur le terrain d'une du-

rée limitée. On ne prévoit cependant pour l'instant aucune utilisation opérationnelle en temps réel des doubles ou triples analyses Doppler en raison des conditions de couverture spatiale nécessaires. Les aéroports, dont les exigences sont limitées à cet égard, pourraient constituer une exception: des systèmes radar bistatiques pourraient y avoir leur utilité (Wurman, Randall et Burghart, 1995).

L'application du radar Doppler à la détection et à la localisation en temps réel d'orages violents a commencé au début des années 70. Donaldson (1970) a sans doute été le premier à identifier l'une des caractéristiques de l'écoulement rotationnel dans un orage violent. Des expériences quasi opérationnelles ont démontré qu'un pourcentage très élevé des signatures rotationnelles obtenues par simple analyse Doppler correspond à des tempêtes de grêle dévastatrices, à de forts vents directs ou à des tornades (Ray *et al.*, 1980; JDOP, 1979).

Depuis lors, on a mis en évidence l'existence de deux caractéristiques propres aux fortes tempêtes, appelées «signatures». La première est celle d'un «mésocyclone», colonne d'air verticale ayant un mouvement rotationnel ascendant, d'un diamètre généralement compris entre 2 et 10 km. On a constaté que la signature d'un mésocyclone apparaît à mi-hauteur du système et descend vers la base des nuages, coïncidant avec le développement des tornades (Burgess, 1976; Burgess et Lemon, 1990). Lors d'expériences quasi opérationnelles réalisées en Oklahoma, ce comportement a permis d'allonger le délai de prévision des tornades de 20 minutes ou davantage (JDOP, 1979). La plupart des observations effectuées par radar Doppler ont eu lieu aux États-Unis. On ne sait pas encore s'il est possible d'en généraliser les conclusions. Au cours des expériences réalisées en Oklahoma, 50 % environ des mésocyclones observés produisaient des tornades confirmées. En outre, toutes les perturbations ayant donné lieu à de violentes tornades, se sont formées dans des milieux marqués par un fort cisaillement (Burgess et Lemon, 1990) et comportaient d'importants mésocyclones.

La deuxième signature, celle du tourbillon d'une tornade, est produite par la tornade proprement dite. Il s'agit de l'emplacement d'une très faible circulation se produisant à l'intérieur du mésocyclone. Dans certains cas, on a détecté cette signature en altitude près d'une demi-heure ou davantage avant qu'une tornade n'atteigne le sol. Plusieurs années d'expérience de cette signature ont démontré sa grande utilité pour la localisation des tornades, généralement à ± 1 km près. On estime qu'il est possible de détecter ainsi 50 à 70 % des tornades se produisant à l'est des hautes plaines des Rocheuses, aux États-Unis (Brown et Lemon, 1976). On a identifié des spectres Doppler

de grande largeur (moment du deuxième ordre) correspondant à la position des tornades. Cependant, on a également établi un rapport entre de grandes largeurs de spectre et de fortes turbulences à l'intérieur des perturbations.

Il apparaît que la divergence calculée à partir des données sur la vitesse radiale est représentative de la divergence totale. Le calcul de la divergence radiale au sommet d'une perturbation correspond au calcul de la hauteur du sommet des échos, indicateur de la force des courants ascendants. Selon des expériences quasi opérationnelles réalisées au moyen de radars Doppler, une augmentation de la divergence est vraisemblablement l'indicateur le plus précoce de l'aggravation d'une perturbation. De plus, on a constaté qu'une forte divergence à proximité du sommet d'une perturbation est un indicateur utile de grêle.

On fait couramment appel à la signature des rafales descendantes par divergence à faible altitude, obtenue au moyen de radars météorologiques Doppler en zone terminale d'espace aérien, pour protéger les avions en cours de décollage et d'atterrissement. Ces radars sont spécialement conçus pour assurer la surveillance de zones restreintes et pour balayer rapidement et de façon répétée l'espace aérien entourant les aérograves. Comme les microrafales ont un cycle d'évolution de 10 à 20 minutes, leur détection efficace nécessite des systèmes radar spécialisés. Dans cette application, l'ensemble radar-ordinateur donne automatiquement l'alerte à la tour de contrôle (Michelson, Schrader et Wieler, 1990).

L'étude au moyen de radars Doppler du rôle des lignes de convergence de la couche limite dans la formation de nouveaux orages vient confirmer les résultats d'études antérieures des arcus effectuées par satellite. Selon certaines indications, les lignes de convergence à méso-échelle de la couche limite (et notamment l'intersection de fronts de rafales issus d'une convection antérieure) jouent un rôle majeur dans la détermination du lieu et du moment de formation de perturbations. Wilson et Schreiber (1986) ont cité et expliqué plusieurs cas, observés par des radars Doppler, de formation de tornades par des lignes de cisaillement du vent non imputables à des précipitations (Mueller et Carbone, 1987).

L'amélioration récente des techniques de traitement et d'affichage numérique des données radar a permis la création de nouveaux produits quantitatifs gérés par radar, destinés à des applications hydrométéorologiques. Dans plusieurs pays d'Europe et au Japon, on associe ces produits à des modèles numériques pour la prévision opérationnelles des crues et la lutte contre les inondations (voir par exemple Cluckie et Owens, 1987).

Des progrès sensibles semblent ainsi possibles, désormais, en ce qui concerne la prévision des orages à échéance de 0 à 2 heures. Pour que ce projet devienne réalité, il faudra intégrer efficacement des données émanant de radars Doppler, des données haute résolution transmises par satellite et des données d'observation en surface et de sondage.

Les radars Doppler sont particulièrement utiles pour suivre les cyclones tropicaux et pour recueillir des données sur l'évolution dynamique de l'œil, du mur de l'œil et des bandes spirales ainsi que sur la position et l'intensité des vents d'ouragan (Ruggiero et Donaldson, 1987; Baynton, 1979).

9.11 **RADARS HAUTE FRÉQUENCE POUR LES MESURES À LA SURFACE DES OCÉANS**

Les signaux radioélectriques émis dans la bande des ondes décamétriques (de 3 à 30MHz) sont rétrodiffusés par les vagues océaniques et subissent un décalage Doppler. Ils peuvent être détectés par un radar décamétrique conçu pour leur observation. L'intensité du signal renvoyé est due à l'interférence constructive des rayons diffusés par des vagues successives espacées de telle façon que ces rayons soient en résonance, comme c'est le cas dans un réseau de diffraction. En cas d'incidence rasante, la résonance se produit lorsque la longueur d'onde des vagues est égale à la moitié de la longueur d'onde des ondes

radioélectriques. Le signal renvoyé subit un décalage Doppler en raison du mouvement des vagues. Il est possible de faire appel au spectre Doppler pour déterminer la direction de ce mouvement, avec une ambiguïté gauche-droite perpendiculairement au faisceau, qu'on peut lever au moyen d'autres informations, données par exemple par un champ de première approximation. Si les vagues sont en équilibre avec le vent de surface, on obtient la direction du vent, mesure météorologique de base obtenue grâce aux radars décamétriques. On peut affiner l'analyse du spectre du signal renvoyé pour obtenir le spectre des vagues et une indication de la vitesse du vent.

Des mesures peuvent être effectuées jusqu'à une distance de 200 km ou davantage au moyen de radars à onde de sol et jusqu'à une distance de 3 000 km ou davantage au moyen de radars à ondes réfléchies. Ces derniers, qui utilisent la réflexion sur l'ionosphère, sont également appelés radars transhorizon.

La plupart des radars décamétriques opérationnels sont militaires, mais certains servent à recueillir régulièrement des données concernant la direction du vent sur des zones très étendues à l'intention des Services hydrométéorologiques.

On trouvera de plus amples informations sur les radars décamétriques et leurs applications météorologiques ainsi qu'une vaste bibliographie complémentaire chez Shearman (1983), Dexter, Heron et Ward (1982), Keenan et Anderson (1987) et Harlan et Georges (1994).

ANNEXE

ÉNONCÉ DE RECOMMANDATIONS DE L'OMM SUR LE CHOIX DE L'EMPLACEMENT DES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES/ÉOLIENNES

Préoccupée par les effets accrus des parcs d'éoliennes sur le fonctionnement des radars météorologiques, l'OMM est d'avis qu'il est nécessaire de procéder à des activités de consultation, de protection et d'atténuation. Elle veut s'adresser aux décideurs, aux organismes nationaux de réglementation des radiofréquences, aux sociétés hydrologiques et météorologiques nationales, aux concepteurs de parcs d'éoliennes, aux fournisseurs d'équipements éoliens et à la communauté météorologique.

La protection des données de radar météorologique est indispensable au bon fonctionnement et à l'amélioration continuos des systèmes de détection, de suivi, de prévision et d'avis météorologiques, au service de la sécurité publique. Les modèles de prévision du temps et les prévisions d'exploitation localisées dépendent aussi de plus en plus des réseaux nationaux de profileurs de vent et de radars météorologiques Doppler terrestres pour les avis de conditions météorologiques dangereuses, comme les tornades, les crues éclair et les ouragans qui pénètrent à l'intérieur des terres, pour les prévisions de précipitations (pluie, neige, grêle), pour la prévention du givrage d'aéronef et pour les évitements de conditions météorologiques par la circulation aérienne. À l'échelle de la planète, les réseaux de radars Doppler et de profileurs de vent rivalisent actuellement avec un nombre accru d'éoliennes.

Les parcs d'éoliennes ont déjà un impact sur les réseaux de radars météorologiques, en engendrant des échos de sol qui provoquent une perte importante de données ou qui sont pris en compte comme des précipitations par les applications hydrologiques. Les vitesses enregistrées sous l'effet des pales en rotation peuvent aussi faire penser à un phénomène météorologique extrême, telle une tornade. Certes des concepteurs d'éoliennes ont accepté de déplacer des radars météorologiques, mais, d'une manière générale, le secteur de la météorologie n'a pas de contrôle sur le choix de l'emplacement des éoliennes et compte sur l'application de règles de «bon voisinage» pour en atténuer les effets.

Il incombera aux météorologistes et aux exploitants d'éoliennes d'établir des plans stratégiques d'atté-

nuation des effets en question quand il s'agira d'installer de nouveaux réseaux de radars et de profileurs de vent ou de nouveaux parcs d'éoliennes. L'OMM et le secteur de la météorologie, qui appuient et comptent sur les organismes internationaux et nationaux de réglementation en matière de radio-communication, encourageront et soutiendront de manière proactive les efforts de ceux-ci destinés à promouvoir et protéger l'utilisation de l'espace non obstrué à des fins météorologiques. L'OMM incite les agences nationales à établir des critères d'obstruction acceptables et à fournir des outils aux concepteurs d'éoliennes pour le choix des emplacements.

On peut se servir de la distance entre les éoliennes et les radars météorologiques pour établir une description générale des effets sur la qualité des données radar et élaborer une stratégie d'atténuation pour le choix en commun de l'emplacement des radars et des éoliennes. Le tableau ci-après présente les directives générales pour des installations radar normales, des sites sur terrain plat qui pourraient nécessiter des modifications et des installations radar particulières. Pour les radars de forte puissance, notamment les radars en bande S (longueur d'onde de 10 cm), caractérisés par une atténuation relativement faible, il est possible qu'il faille augmenter les distances minimales indiquées dans le tableau.

L'OMM encourage le financement et la réalisation d'études visant à développer des technologies d'atténuation des impacts. Le recours à des techniques de traitement des signaux radar ou à des matériaux différents pour la construction des éoliennes pourrait atténuer les échos parasites à grande distance. L'Organisation recommande par ailleurs que les résultats de ces études soient communiqués aux fabricants de radars et d'éoliennes.

Toutes les nations ont intérêt à protéger l'espace libre d'obstruction pour les radars météorologiques et les profileurs de vent, qui jouent un rôle crucial dans la prévision des conditions météorologiques extrêmes. Il faut chercher des solutions technologiques à l'échelle locale et nationale. L'OMM appuiera et fournira des textes d'orientation et outils en vue d'assurer cette protection.

<i>Distance</i>	<i>Effets potentiels</i>	<i>Directive</i>
de 0 à 5 km	L'éolienne peut obstruer complètement ou partiellement le radar, ce qui peut occasionner des pertes importantes de données ne pouvant être récupérées.	Zone d'impact défini : il ne faudrait pas installer d'éolienne dans cette zone.
de 5 à 20 km	Les réflexions multiples et la diffusion multivoie peuvent engendrer de faux échos et de multiples hauteurs. Il est possible que la mesure Doppler de la vitesse soit faussée par les pales en rotation.	Zone d'impact modéré : la topographie est un facteur. Il est recommandé de procéder à une analyse et à des consultations. Changer l'orientation ou l'emplacement des éoliennes individuelles pourrait réduire ou atténuer les effets.
de 20 à 45 km	Généralement visible sur le balayage en site le plus bas ; des genres d'échos de sol sont observés en réflectivité ; il est possible que la mesure Doppler de la vitesse soit faussée par les pales en rotation.	Zone d'impact faible : il est recommandé de procéder à une notification.
> 45 km	Généralement pas observé dans les données, mais pouvant être visibles en raison des conditions de propagation.	Zone d'impact intermittent : il est recommandé de procéder à une notification.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Ahnert, P.R., M. Hudlow, E. Johnson, D. Greene et M. Dias, 1983 : Proposed on-site processing system for NEXRAD. *Texte préliminaire de la vingt et unième Conférence sur la météorologie radar* (Edmonton, Canada), American Meteorological Society, Boston, p. 378-385.
- Aoyagi, J., 1983 : A study on the MTI weather radar system for rejecting ground clutter. *Papers in Meteorology and Geophysics*, Volume 33, N° 4, p. 187-243.
- Aoyagi, J. et N. Kodaira, 1995 : The reflection mechanism of radar rain echoes. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 246-248.
- Atlas, D., 1964 : Advances in radar meteorology. *Advances in Geophysics* (sous la direction de H.E. Landsberg et de J. Van Meighem), Volume 10, Academic Press, New York, p. 317-479.
- Atlas, D. (sous la direction de), 1990 : *Radar in Meteorology*. American Meteorological Society, Boston.
- Atlas, D., R.C. Scrivastava et R.S. Sekhon, 1973 : Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Volume 11, N° 1, p. 1-35.
- Battan, L.J., 1981 : *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press, Chicago.
- Baynton, H.W., 1979 : The case for Doppler radars along our hurricane affected coasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 60, p. 1014-1023.
- Bean, B.R. et E.J. Dutton, 1966 : *Radio Meteorology*. Washington DC, U.S. Government Printing Office.
- Bebbington, D.H.O., 1992 : Degree of Polarization as a Radar Parameter and its Susceptibility to Coherent Propagation Effects. *Texte préliminaire du symposium de la commission F de l'URSI sur la propagation des ondes et la télédétection* (Ravenscar, Royaume-Uni), p. 431-436.
- Bringi, V.N. et A. Hendry, 1990 : Technology of polarization diversity radars for meteorology. In : *Radar in Meteorology* (sous la direction de D. Atlas) American Meteorological Society, Boston, p. 153-190.
- Browning, K.A. et R. Wexler, 1968 : The determination of kinetic properties of a wind field using Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 7, p. 105-113.
- Brown, R.A. et L.R. Lemon, 1976 : Single Doppler radar vortex recognition: Part II – Tornadic vortex signatures. *Texte préliminaire de la dix-septième Conférence sur la météorologie radar* (Seattle, Washington), American Meteorological Society, Boston, p. 104-109.
- Browning, K.A. et C.G. Collier, 1982 : *An integrated radar-satellite nowcasting system in the United Kingdom*. In : *Nowcasting* (sous la direction de K.A. Browning). Academic Press, Londres, p. 47-61.
- Browning, K.A., C.G. Collier, P.R. Larke, P. Menmuir, G.A. Monk et R.G. Owens, 1982 : On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Monthly Weather Review*, Volume 110, p. 534-552.
- Burgess, D.W., 1976 : Single Doppler radar vortex recognition: Part I – Mesocyclone signatures. *Texte préliminaire de la dix-septième Conférence sur la météorologie radar* (Seattle, Washington). American Meteorological Society, Boston, p. 97-103.
- Burgess, D.W. et L.R. Lemon, 1990 : Severe thunderstorm detection by radar. In *Radar in Meteorology* (sous la direction de D. Atlas). American Meteorological Society, Boston, p. 619-647.
- Burrows, C.R. et S.S. Attwood, 1949 : *Radio Wave Propagation*. Academic Press, New York.
- Byers, H.R., 1948 : The use of radar in determining the amount of rain falling over a small area. *Actes de l'American Geophysical Union*, p. 187-196.
- Cluckie, I.D. et M.E. Owens, 1987 : *Real-time Rainfall Run-off Models and Use of Weather Radar Information*. In: *Weather Radar and Flood Forecasting* (sous la direction de V.K. Collinge et de C. Kirby), John Wiley and Sons, New York.
- Collier, C.G., 1989 : *Applications of Weather Radar Systems : A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*. John Wiley and Sons, Chichester, Angleterre.
- Commission des communautés européennes, 1990 : *Une revue du programme ARAMIS* (J.L. Cheze). Séminaire sur le projet Cost 73: Weather Radar Networking (Bruxelles, 5-8 septembre 1989), p. 80-85.
- Crozier, C.L., P. Joe, J. Scott, H. Herscovitch et T. Nichols, 1991 : The King City operational Doppler radar: Development, all-season applications and forecasting. *Atmosphere-Ocean*, Volume 29, p. 479-516.
- Dennis, A.S., C.A. Schock, et A. Koscielski, 1970 : Characteristics of hailstorms of western South Dakota. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 9, p. 127-135.
- Dexter, P.E., M.L. Heron et J.F. Ward, 1982 : Remote sensing of the sea-air interface using HF radars. *Australian Meteorological Magazine*, Volume 30, p. 31-41.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Donaldson, R.J., Jr., 1970 : Vortex signature recognition by a Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 9, p. 661-670.
- Doneaud, A.A., S. Ionescu-Niscov, D.L. Priegnitz et P.L. Smith, 1984 : The area-time integral as an indicator for convective rain volumes. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 23, p. 555-561.
- Doneaud, A.A., J.R. Miller Jr., L.R. Johnson, T.H. Vonder Haar et P. Laybe, 1987 : The area-time integral technique to estimate convective rain volumes over areas applied to satellite data: A preliminary investigation. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 26, p. 156-169.
- Doviak, R.J. et D.S. Zrnic, 1993 : *Doppler Radar and Weather Observations*. Deuxième édition, Academic Press, San Diego.
- Eccles, P.J. et D. Atlas, 1973 : A dual-wavelength radar hail detector. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 12, p. 847-854.
- Eilts, M.D. et S.D. Smith, 1990 : Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 7, p. 118-128.
- English, M.E., B. Kochtubajda, F.D. Barlow, A.R. Holt et R. McGuiness, 1991 : Radar measurement of rainfall by differential propagation phase: A pilot experiment. *Atmosphere-Ocean*, Volume 29, p. 357-380.
- Federer, B., A. Waldvogel, W. Schmid, F. Hampel, E. Rosini, D. Vento et P. Admirat, 1978 : Grossversuch IV: Design of a randomized hail suppression experiment using the Soviet method. *Pure and Applied Geophysics*, 117, p. 548-571.
- Gossard, E.E. et R.G. Strauch, 1983 : *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Publication scientifique Elsevier, Amsterdam.
- Harlan, J.A. et T.M. Georges, 1994 : An empirical relation between ocean-surface wind direction and the Bragg line ratio of HF radar sea echo spectra. *Journal of Geophysical Research*, Volume 99, C4, p. 7971-7978.
- Heiss, W.H., D.L. McGrew et D. Sirmans, 1990 : NEXRAD: Next generation weather radar (WSR-88D). *Microwave Journal*, Volume 33, N° 1, p. 79-98.
- Holleman, I., 2001 : *Hail Detection Using Single-polarization Radar*. Rapport scientifique, Institut météorologique royal néerlandais (KNMI) WR-2001-01, De Bilt.
- Holleman, I., H.R.A. Wessels, J.R.A. Onvlee et S.J.M. Barlag, 2000 : Development of a hail-detection pro-
- duct. *Physics and Chemistry of the Earth*, Partie B, 25, p. 1293-1297.
- Holt, A.R., M. Chandra et S.J. Wood, 1995 : Polarisation diversity radar observations of storms at C-Band. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 188-189.
- Holt, A.R., P.I. Joe, R. McGuinness et E. Torlaschi, 1993 : *Some examples of the use of degree of polarization in interpreting weather radar data*. *Compte rendu de la vingt-sixième Conférence internationale sur la météorologie radar*, American Meteorological Society, p. 748-750.
- JDOP (Joint Doppler Operational Project), 1979 : *Final Report on the Joint Doppler Operational Project*. Note technique de la NOAA, ERL NSSL-86, Norman, Oklahoma, National Severe Storms Laboratory.
- Joe, P., R.E. Passarelli et A.D. Siggia, 1995 : Second trip unfolding by phase diversity processing. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 770-772.
- Joss, J. et A. Waldvogel, 1990 : Precipitation measurement and hydrology. In : *Radar in Meteorology* (sous la direction de D. Atlas), American Meteorological Society, Boston, p. 577-606.
- Joss, J. et R.W. Lee, 1993 : Scan strategy, clutter suppression calibration and vertical profile corrections. *Texte préliminaire de la vingt-sixième Conférence sur la météorologie radar* (Norman, Oklahoma), American Meteorological Society, Boston, p. 390-392.
- Keeler, R.J., C.A. Hwang et E. Loew, 1995 : Pulse compression weather radar waveforms. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 767-769.
- Keenan, T.D. et S.J. Anderson, 1987 : Some examples of surface wind field analysis based on Jindalee skywave radar data. *Australian Meteorological Magazine*, 35, p. 153-161.
- Leber, G.W., C.J. Merrit et J.P. Robertson, 1961 : WSR-57 Analysis of Heavy Rains. *Texte préliminaire de la neuvième Conférence sur la météorologie radar*, American Meteorological Society, Boston, p. 102-105.
- Lee, R., G. Della Bruna et J. Joss, 1995 : Intensity of ground clutter and of echoes of anomalous propagation and its elimination. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 651-652.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Lemon, L.R., D.W. Burgess et R.A. Brown, 1978 : Tornadic storm airflow and morphology derived from single-Doppler radar measurements. *Monthly Weather Review*, Volume 106, p. 48-61.
- Leone, D.A., R.M. Endlich, J. Petriceks, R.T.H. Collis et J.R. Porter, 1989 : Meteorological considerations used in planning the NEXRAD network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 70, p. 4-13.
- Lhermitte, R. et D. Atlas, 1961 : Precipitation motion by pulse Doppler radar. *Texte préliminaire de la neuvième Conférence sur la météorologie radar*, American Meteorological Society, Boston, p. 218-233.
- Makihara, Y., 2000 : Algorithms for precipitation nowcasting focused on detailed analysis using radar and raingauge data. *Rapport technique du Meteorological Research Institute*, JMA, 39, p. 63-111.
- Marshall, J.S. et K.L.S. Gunn, 1952 : Measurement of snow parameters by radar. *Journal of Meteorology*, Volume 9, p. 322-327.
- Marshall, J.S. et W.M. Palmer, 1948 : The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, Volume 5, p. 165-166.
- Melnikov, V., D.S. Zrnic, R.J. Dovink et J.K. Carter, 2002 : Status of the dual polarization upgrade on the NOAA's research and development WSR-88D. *Texte préliminaire de la dix-huitième Conférence internationale sur les systèmes interactifs de traitement de l'information* (Orlando, Floride), American Meteorological Society, Boston, p. 124-126.
- Michelson, M., W.W. Schrader et J.G. Wilson, 1990 : Terminal Doppler weather radar. *Microwave Journal*, Volume 33, N° 2, p. 139-148.
- Mie, G., 1908 : Beiträge zur Optik träber Medien, speziell kolloidaler Metalllösungen. *Annalen der Physik*, 25, p. 377-445.
- Mueller, C.K. et R.E. Carbone, 1987 : Dynamics of a thunderstorm outflow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 44, p. 1879-1898.
- Mueller, E.A., S.A. Rutledge, V.N. Bringi, D. Brunckow, P.C. Kennedy, K. Pattison, R. Bowie et V. Chandrasekar, 1995 : CSU-CHILL radar upgrades. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 703-706.
- Neff, E.L., 1977 : How much rain does a rain gage gage? *Journal of Hydrology*, Volume 35, p. 213-220.
- Organisation météorologique mondiale, 1985 : *Use of Radar in Meteorology* (G.A. Clift). Note technique N° 181, WMO-No. 625, Genève.
- Passarelli, R.E., Jr., P. Romanik, S.G. Geotis et A.D. Siggia, 1981 : Ground clutter rejection in the frequency domain. *Texte préliminaire de la vingtième Conférence sur la météorologie radar* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, p. 295-300.
- Probert-Jones, J.R., 1962 : The radar equation in meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 88, p. 485-495.
- Ray, P.S., C.L. Ziegler, W. Bumgarner et R.J. Serafin, 1980 : Single- and multiple-Doppler radar observations of tornadic storms. *Monthly Weather Review*, Volume 108, p. 1607-1625.
- Rinehart, R.E., 1991 : *Radar for Meteorologists*. Grand Forks, North Dakota, University of North Dakota, Department of Atmospheric Sciences.
- Ruggiero, F.H. et R.J. Donaldson, Jr., 1987 : Wind field derivatives : A new diagnostic tool for analysis of hurricanes by a single Doppler radar. *Texte préliminaire de la dix-septième Conférence sur les ouragans et la météorologie tropicale* (Miami, Floride), American Meteorological Society, Boston, p. 178-181.
- Sauvageot, H., 1982 : *Radarmétéorologie*. Eyrolles, Paris.
- Sauvageot, H., 1994 : Rainfall measurement by radar: A review. *Atmospheric Research*, Volume 35, p. 27-54.
- Seliga, T.A. et V.N. Bringi, 1976 : Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 15, p. 69-76.
- Shearman, E.D. R., 1983 : Radio science and oceanography. *Radio Science*, Volume 18, N° 3, p. 299-320.
- Skolnik, M.I. (sous la direction de), 1970 : *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Smith, P.L., 1990 : Precipitation measurement and hydrology: Panel report. In : *Radar in Meteorology*. (sous la direction de D. Atlas), American Meteorological Society, Boston, p. 607-618.
- Smith, P.L., 1995 : Dwell time considerations for weather radars. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 760-762.
- Strauch, R.G., 1981 : Comparison of meteorological Doppler radars with magnetron and klystron transmitters. *Texte préliminaire de la vingtième Conférence sur la météorologie radar* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, p. 211-214.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Ulbrich, C.W. et D. Atlas, 1984 : Assessment of the contribution of differential polarization to improve rainfall measurements. *Radio Science*, Volume 19, N° 1, p. 49-57.
- Wilson, J.W. et W.E. Schreiber, 1986 : Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. *Monthly Weather Review*, Volume 114, p. 2516-2536.
- Wood, V.T. et R.A. Brown, 1986 : Single Doppler velocity signature interpretation of nondivergent environmental winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 3, p. 114-128.
- Wurman, J., M. Randall et C. Burghart, 1995 : Real-time vector winds from a bistatic Doppler radar network. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, p. 725-728.
- Zrnic, D.S. et S. Hamidi, 1981 : *Considerations for the Design of Ground Clutter Cancelers for Weather Radar*. Rapport DOT/FAA/RD-81/72, NTIS, p. 77.
- Zrnic, D.S. et A.V. Ryzhkov, 1995 : Advantages of rain measurements using specific differential phase. *Texte préliminaire de la vingt-septième Conférence sur la météorologie radar* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, p. 35-37.

CHAPITRE 10

TECHNIQUES D'OBSERVATION PAR BALLONS-MÉTÉOROLOGIQUES

10.1 **BALLONS**

10.1.1 **Principaux types de ballons**

Les ballons météorologiques se répartissent en deux grandes catégories :

- a) Les ballons pilotes qui servent à mesurer visuellement le vent en altitude et les ballons plafonnants destinés à mesurer la hauteur de la base des nuages. Ils emportent généralement de faibles charges et sont donc infiniment plus petits que les ballons de radiosondage. Ils sont presque toujours de type sphérique dilatable et la principale exigence, outre leur faculté à atteindre des altitudes suffisantes, concerne leur capacité à conserver leur forme sphérique pendant l'ascension.
- b) Les ballons qui servent à transporter des instruments d'enregistrement ou de transmission pour les observations courantes en altitude sont également de type sphérique dilatable. Appelés ballons-sondes ou radiosondes, ils doivent être d'une dimension et d'une qualité suffisante pour pouvoir emporter la charge utile requise (variant généralement de 200 g à 1 kg) à des altitudes pouvant atteindre 35 km à une vitesse verticale suffisamment grande pour ventiler correctement les instruments de mesure. Pour mesurer les vents en altitude par radar, on fait appel à de gros ballons-pilotes (100 g) ou radiosondes selon le poids et la traînée de l'équipement emporté.

Le présent chapitre ne traite pas des autres types de ballons exploités à des fins particulières. Les ballons à niveau constant qui montent puis dérivent à une altitude pré-déterminée sont construits dans un matériau inextensible. De gros ballons à niveau constant sont remplis partiellement au largage ; d'autres, pressurisés, sont gonflés de manière à ce que leur enveloppe se déploie complètement à l'envol. Les tétrons sont de petits ballons tétraédriques pressurisés à niveau constant destinés à étudier les trajectoires. L'emploi de ce type de ballon pour obtenir des profils est traité au chapitre 5 de la présente Partie.

10.1.2 **Fabrication et propriétés**

Les matériaux les plus adaptés à la réalisation des ballons dilatables sont un latex naturel de haute qualité et un latex polychloroprène. Le latex naturel

se déforme moins que le polychloroprène, est plus résistant et peut s'appliquer en couche plus épaisse pour une performance donnée. Il est moins sensible à la température, mais plus sensible à l'ozone et au rayonnement ultraviolet à haute altitude, et possède une durée de vie au stockage plus courte. C'est pourquoi, afin de prolonger la durée limite de stockage, améliorer la résistance et les performances de ces deux matériaux à basses températures tant en magasin qu'en vol, leur résistance à l'ozone et au rayonnement ultraviolet, on peut les traiter à l'aide d'un certain nombre d'additifs. En outre, l'ajout d'un agent antistatique en cours de fabrication permet de réduire les risques d'explosion des ballons gonflés à l'hydrogène.

Il existe deux grands procédés de fabrication d'un ballon dilatable: par immersion d'une forme dans une émulsion de latex ou projection de latex sur la face intérieure d'un moule creux. Le moulage permet de conférer au ballon une épaisseur plus uniforme, ce qui les aide à supporter la dilatation qu'entraîne l'ascension, et de couler le col d'une seule pièce avec l'enveloppe et ainsi éviter tout risque de formation de points de fragilité.

Le polyéthylène est la matière inextensible utilisée pour les ballons à niveau constant.

10.1.3 **Spécifications**

Le ballon fini doit être exempt de tout corps étranger, trou d'aiguille et autres défauts, de texture homogène et d'épaisseur uniforme. Selon la taille du ballon, le diamètre du col oscillera entre un et cinq centimètres et la longueur entre 10 et 20 cm. Le col d'un ballon-sonde doit pouvoir résister à une force de 200 N sans dommage. Il importe que l'épaisseur de l'enveloppe se renforce graduellement vers l'encolure afin d'en atténuer le risque d'arrachement: toute rupture de continuité dans l'épaisseur constitue un point de fragilité.

La taille des ballons dépend de leur poids nominal en grammes. Le poids réel de chaque ballon ne doit pas s'écartez de plus de dix pour cent du poids nominal spécifié, voire de préférence cinq pour cent. La capacité de dilatation d'un ballon doit pouvoir atteindre au moins quatre fois, et de préférence cinq à six fois, son diamètre en position non déployée sur une durée minimum d'une heure. Une fois gonflé, le ballon présentera la forme d'une sphère ou d'une poire.

La dégradation des ballons pendant l'entreposage pose un problème important, en particulier dans les régions tropicales. Il existe bien des tests de vieillissement artificiel, mais ils n'offrent pas d'indications fiables en la matière. L'un des tests consiste à placer des ballons échantillons durant quatre jours dans un four à 80° C, ce qui, d'après les calculs, équivaut approximativement à quatre années d'exposition aux conditions tropicales. Après ce traitement, les ballons devront satisfaire aux exigences minimales de dilatation. Il est donc essentiel, pour éviter tout risque de détérioration rapide des ballons, d'accorder un soin particulier à l'emballage et ainsi les protéger contre la lumière (en particulier la lumière du soleil), l'air frais ou les températures extrêmes.

Lors de la fabrication des ballons en latex synthétique, on incorpore un plastifiant pour éviter que le matériau ne durcisse ou ne gèle une fois exposé aux basses températures au voisinage et au-dessus de la tropopause. Certains fabricants proposent deux types de ballons destinés à être utilisés le jour ou la nuit selon le dosage du plastifiant.

10.2 COMPORTEMENT DES BALLONS

10.2.1 Vitesse ascensionnelle

En vertu du principe d'Archimède, la force ascensionnelle totale d'un ballon est fonction de la poussée totale du gaz qu'il contient, calculée comme suit :

$$T = V(\rho - \rho_g) = 0.523 D^3 (\rho - \rho_g) \quad (10.1)$$

où T est la force ascensionnelle totale; V le volume du ballon; ρ la densité de l'air; ρ_g la densité du gaz et D le diamètre du ballon, supposé sphérique.

Toutes ces unités sont exprimées en unités SI. Pour l'hydrogène, la poussée verticale au sol ($\rho - \rho_g$) est d'environ 1,2 kg m⁻³. Toutes les grandeurs de l'équation (10.1) changent avec l'altitude.

La force ascensionnelle libre L d'un ballon est la différence entre la force ascensionnelle totale et le poids cumulé W de l'engin et de sa charge (éventuelle) :

$$L = T - W \quad (10.2)$$

En d'autres termes, elle correspond à la poussée verticale nette ou au poids supplémentaire que le ballon et ses accessoires peut supporter sans monter ni descendre.

D'après le principe de similitude dynamique, on peut exprimer la vitesse ascensionnelle V d'un ballon par temps calme par la formule générale suivante :

$$V = \frac{qL^n}{(L + W)^{1/3}} \quad (10.3)$$

Dans laquelle q et n dépendent du coefficient de frottement et donc du nombre de Reynolds, $\nu\rho D/\mu$ (μ correspondant à la viscosité de l'air). Il est à regretter que, dans certaines phases de vol, le nombre de Reynolds d'un grand nombre de ballons météorologiques, dont la forme n'est pas toujours parfaitement sphérique, se situe dans la zone critique comprise entre 1.10⁵ to 3.10⁵, où le coefficient de frottement change rapidement, si bien qu'il est impossible d'appliquer une formule simple valable quelle que soit la taille du ballon et la force ascensionnelle libre. Il faut donc calculer empiriquement les valeurs de q et n dans l'équation ci-dessus, lesquelles sont très approximativement égales à 150 et 0,5 respectivement si la vitesse ascensionnelle est exprimée en m par min⁻¹. D'autres paramètres, tels qu'une modification de la densité de l'air ou une fuite de gaz, peuvent également affecter cette vitesse et lui infliger des variations sensibles avec l'altitude.

Il peut s'avérer nécessaire d'accroître la force ascensionnelle libre dans une proportion pouvant atteindre 75 % en fonction de l'intensité du phénomène quand les sondages ont lieu dans des conditions de précipitations ou de givrage. Il est recommandé de se référer à une vitesse ascensionnelle estimée du ballon uniquement lorsque les précipitations sont faibles. Il n'est en général pas indispensable de connaître avec exactitude la vitesse ascensionnelle, sauf dans les cas d'observation par ballon-pilote ou ballon-plafonnant dans lesquels ce paramètre est la seule donnée disponible pour calculer l'altitude. La vitesse ascensionnelle dépend en grande partie de la force ascensionnelle libre et de la résistance que l'air oppose au ballon et à son train, l'effet de cette dernière étant parfois plus important, notamment sur les ballons non sphériques. L'altitude maximale qu'un ballon peut atteindre est principalement fonction de sa force ascensionnelle totale, de ses dimensions et de sa qualité.

10.2.2 Performances

Le tableau ci-après présente les chiffres très approximatifs correspondant aux performances types des ballons de différentes tailles. Pour déterminer les performances d'un ballon et de son train en vue de connaître avec exactitude ses performances, il convient d'analyser des vols réels. Les ballons peuvent emporter des charges utiles supérieures à celles indiquées dans le tableau.

Performances usuelles des ballons

Poids (g)	10	30	100	200	350	600	1 000	1 500	3 000
Diamètre au lâcher (cm)	30	50	90	120	130	140	160	180	210
Charge utile (g)	0	0	0	250	250	250	250	1 000	1 000
Force ascensionnelle libre (g)	5	60	300	500	600	900	1 100	1 300	1 700
Vitesse ascensionnelle (m min ⁻¹)	60	150	250	300	300	300	300	300	300
Altitude maximum (km)	12	13	20	21	26	31	34	34	38

Il faudra pour cela augmenter le volume du ballon et utiliser une plus grande quantité de gaz, ce qui aura une incidence sur la vitesse ascensionnelle et l'altitude maximale à laquelle il sera capable de monter.

Le choix d'un ballon à des fins météorologiques est dicté par la charge à emporter (le cas échéant), la vitesse ascensionnelle et l'altitude à atteindre, ainsi que la couleur de l'enveloppe lorsque le vol est suivi à vue par temps couvert. En général, il est conseillé d'adopter une vitesse ascensionnelle comprise entre 300 et 400 m min⁻¹ afin de réduire au minimum la durée d'observation et garantir une ventilation suffisante des capteurs de la radiosonde. En outre, il ne faut pas oublier qu'un ballon monte d'ordinaire moins haut lorsque la température est très basse au moment du lancer.

Dans le cadre des observations courantes, il peut s'avérer utile de déterminer la force ascensionnelle libre qui produira les hauteurs d'éclatement optimales. Il a par exemple été constaté qu'une réduction de la vitesse ascensionnelle moyenne de 390 à 310 m min⁻¹ pour certains ballons de taille moyenne via la réduction de la quantité de gaz embarqué peut augmenter de 2 km en moyenne la hauteur d'éclatement. Les relevés des hauteurs d'éclatement devront être archivés et révisés afin de garantir la mise en œuvre d'une pratique optimale.

L'emploi de ballons incolores par temps clair et bien ensoleillé et de ballons foncés par temps couvert, facilite les observations visuelles diurnes.

Le meilleur critère pour apprécier les performances d'un ballon est l'extension linéaire maximale qu'il supporte avant d'éclater, facilement exprimée par le rapport diamètre (ou circonférence) de l'enveloppe à l'éclatement / avant gonflage. Les performances d'un ballon en vol ne sont cependant pas nécessairement les mêmes que celles enregistrées lors d'un essai d'éclatement au sol. En effet, celles-ci peuvent

être affectées par des erreurs de manipulation au moment du gonflage et par les contraintes subies au cours d'un lancer effectué lorsque le vent souffle en rafales. En vol, la dilatation du ballon peut également être affectée par une perte d'élasticité due à de basses températures, par l'action chimique de l'oxygène, de l'ozone ou du rayonnement ultraviolet et par des défauts de fabrication tels que des trous d'aiguille ou des points de fragilité. Un ballon de bonne qualité doit toutefois pouvoir se dilater d'au moins quatre fois son volume en conditions réelles de sondage. L'épaisseur de l'enveloppe au lâcher oscille généralement entre 0,1 et 0,2 mm.

Pendant l'ascension, la tension du caoutchouc provoque toujours à l'intérieur de l'enveloppe une légère surpression p_1 de quelques hectopascals qui empêche le ballon de monter au-delà d'une certaine altitude correspondant à une pression extérieure limite. On peut démontrer que si la température est identique à l'intérieur et à l'extérieur du ballon, cette pression limite p est donnée par :

$$p = \left(\frac{1.07W}{L_0} + 0.075 \right) p_1 \cong \frac{Wp_1}{L_0} \quad (10.4)$$

où W est le poids du ballon avec ses accessoires et L_0 la force ascensionnelle libre au sol, tous deux exprimés en grammes. Si le ballon est capable d'atteindre l'altitude correspondant p , il y dérive horizontalement.

10.3 MANIPULATION DES BALLONS

10.3.1 Stockage

Il est extrêmement important de stocker les ballons-sondes dans de bonnes conditions afin de leur conserver toutes leurs propriétés au fil des

mois. Il est conseillé de limiter les stocks au strict minimum compatible avec les besoins de l'exploitation. Si possible, il conviendra de préférer des réapprovisionnements fréquents aux achats en grandes quantités qui impliquent de longues durées de stockage. En tout état de cause, il est recommandé de toujours utiliser les ballons dans un ordre chronologique en fonction de leur date de fabrication.

Il est généralement possible d'obtenir des résultats optimaux sur une durée de 18 mois maximum à compter de la date de fabrication si les conditions de stockage recommandées par les différents fabricants ont été scrupuleusement respectées. Les consignes générales suivantes s'appliquent à la plupart des ballons-sondes.

Les ballons devront être stockés à l'abri des rayons directs du soleil et, si possible, dans l'obscurité. Ils ne devront en aucun cas être entreposés à proximité d'une source de chaleur ou d'ozone. En effet, l'ozone émis par de gros générateurs ou moteurs électriques altère la qualité du polychloroprène (pur ou mélangé) et du caoutchouc naturel. Tous les ballons devront être conservés dans leur emballage d'origine jusqu'aux préparatifs du lancement. Il conviendra de bien veiller à ce qu'ils n'entrent pas en contact avec de l'huile ou toute autre substance susceptible de pénétrer à l'intérieur de ce dernier et ainsi les endommager.

Si les conditions le permettent, les ballons devront être stockés dans un local à une température située entre 15 et 25° C. Certains fabricants donnent des instructions particulières qu'il conviendra de bien respecter.

10.3.2 Conditionnement

Les ballons en caoutchouc naturel n'exigent aucun traitement thermique particulier avant emploi dans la mesure où ce matériau ne gèle pas à température ambiante dans des locaux habités. Il est toutefois recommandé de placer les ballons qui auraient été conservés sur une longue période à une température inférieure à 10° C dans un endroit tempéré pendant quelques semaines.

Les ballons en polychloroprène perdent une partie de leur élasticité lorsqu'on les stocke longtemps à des températures inférieures à 10°C. C'est pourquoi, pour un meilleur résultat, il faudra y remédier en procédant au conditionnement du ballon conformément aux recommandations du fabricant avant de le gonfler. En général, il suffit de placer le ballon pendant quelques jours dans une chambre isotherme à ventilation forcée, en respectant les conditions

requises de température et humidité, ou de le plonger dans un bain d'eau tiède.

Les ballons utilisés dans les stations polaires doivent présenter des propriétés spéciales qui leur permettront de conserver leurs capacités de résistance et d'élasticité par grand froid.

10.3.3 Gonflage

En l'absence de lanceur mécanique, il convient d'affecter au gonflage un hangar spécial, bien aéré (ex. NFPA, 1999) et de préférence à l'écart des autres bâtiments. Si le gaz utilisé est de l'hydrogène, des précautions particulières devront être prise (section 10.6). Le hangar ne devra comporter aucune source susceptible de produire des étincelles et tous les interrupteurs et équipements électriques devront être à l'épreuve des étincelles (voir précisions en section 10.6.2). Si le gaz utilisé est de l'hélium, des dispositions devront être prises pour chauffer le hangar par temps froid. Les murs, les portes et le sol devront présenter un fini lisse, exempt de toute trace de poussières. Le hangar dédié au gonflage à l'hydrogène peut être chauffé à la vapeur d'eau, l'eau chaude ou tout autre moyen indirect. Tout éventuel chauffage électrique devra respecter le code national de sécurité électrique (ex. NFPA 50A pour la classe I, Division 2, locations).

Le port de vêtements de protection (voir section 10.6.4) est obligatoire pendant les opérations de gonflage. L'opérateur ne doit pas séjourner dans un local clos avec un ballon rempli d'hydrogène. L'alimentation en hydrogène et le remplissage doivent être commandés de l'extérieur si les portes sont fermées, ou si ce n'est pas le cas, ces dernières devront rester ouvertes.

L'opération de gonflage devra être lente car toute dilatation brusque peut entraîner la formation de points de fragilité dans l'enveloppe du ballon. Il est recommandé de prévoir un manodétendeur sensible pour pouvoir régler l'afflux de gaz. On peut déterminer le volume de gaz à insuffler (poussée libre) au moyen d'un manchon tare du poids exigé ou d'un manchon formant le bras d'une balance avec laquelle on mesure la force ascensionnelle du ballon. Le dernier procédé est moins commode, sauf si l'on veut prendre en compte les différences de poids entre les ballons, ce qui s'impose rarement dans la pratique courante. Il est recommandé de prévoir une soupape actionnée par la balance. Certains services ont même perfectionné le système en se servant d'une vanne réglable qui se ferme automatiquement lorsque la poussée ascensionnelle a atteint la valeur désirée.

10.3.4 **Lancer**

Il convient de garder le ballon sous abri jusqu'à ce que tout soit prêt pour le lancer. Toute exposition prolongée au soleil risque de détériorer rapidement l'enveloppe et même provoquer l'éclatement de l'engin avant qu'il n'ait quitté le sol. Le port de vêtements de protection est obligatoire lors des lancers manuels.

Le largage de ballons-sondes ne pose pas de problème particulier par vent léger. Il est recommandé de bien veiller à ce que le ballon et les instruments ne puissent pas aller heurter des arbres ou des bâtiments au voisinage de la station. Une grande vigilance dans l'aménagement de l'aire de lancer permettra d'éliminer dans une large mesure les incidents de ce genre. L'aire sélectionnée devra éviter le plus grand nombre possible d'obstacles susceptibles de gêner les opérations. Les bâtiments de la station devront en outre être conçus et implantés en fonction des vents dominants, des effets de rafales sur l'aire de lancement et des phénomènes de chasse-neige dans les climats froids.

Par vent violent, il est également conseillé de maintenir aussi courte que possible la suspente des instruments sous le ballon pendant le lancer. Un dispositif commode à cette fin se compose d'un dévidoir sur lequel on enroule la cordelette de suspension et d'un axe commandé par un frein à air ou un échappement qui la laisse se dérouler lentement après le largage.

Les lanceurs mécaniques présentent le grand avantage d'offrir une sécurité presque absolue car ils permettent aux opérateurs de rester éloigner du ballon pendant les opérations de gonflage et de largage. Il est possible de les automatiser jusqu'à éliminer toute intervention humaine d'un bout à l'autre de l'opération de radiosondage, mais ils deviennent inutilisables lorsque la vitesse du vent dépasse 20 m s^{-1} . Des mesures devront être prises pour assurer une bonne ventilation des capteurs des radiosondes avant le lancer et veiller à ce que la structure soit à l'épreuve du feu ou des explosions.

10.4 **ACCESSOIRES**

10.4.1 **Éclairage pour les sondages nocturnes**

La source de lumière la plus communément employée pour les sondages nocturnes à l'aide de ballons-pilotes est une petite lampe électrique alimentée par une batterie. Deux piles sèches de 1,5 V (ou une pile amorçable à l'eau de 2,5 V) et une ampoule de 0,3 A peuvent également convenir. On peut également faire appel à un système d'éclairage à fluorescence chimique. Il faut cependant recourir à un

éclairage plus puissant (deux à trois watts), éventuellement associé à un réflecteur simple pour les sondages à grande altitude.

Pour que l'emport d'un éclairage ne ralentisse pas la vitesse ascensionnelle, il faut théoriquement accroître légèrement la force ascensionnelle libre, c'est-à-dire augmenter la force ascensionnelle totale d'un peu plus que du poids de la charge supplémentaire transportée (voir équation 10.3). En réalité, l'augmentation nécessaire sera probablement inférieure à celle calculée car la charge améliore le profil aérodynamique et la stabilité du ballon.

On utilisait naguère une petite bougie dans une lanterne en papier translucide accrochée à environ deux mètres sous le ballon. Cette pratique est déconseillée car la bougie risque de produire une explosion ou des flammes si elle se rapproche accidentellement du ballon ou de la source d'hydrogène, et ainsi déclencher un feu de forêt ou tout autre sinistre grave en retombant au sol.

10.4.2 **Parachutes**

Pour éviter qu'un instrument de sondage ne subisse ou ne cause des dégâts à l'atterrissement, on le munit habituellement d'un parachute rudimentaire. Les conditions principales que celui-ci doit remplir sont de s'ouvrir facilement, de ramener la vitesse de descente à 5 m s^{-1} au plus à l'approche du sol et de résister à l'eau. Un disque de papier imperméabilisé ou de film plastique d'un diamètre d'environ deux mètres et une suspente faite de cordelettes longues d'environ trois mètres suffisent pour des instruments dont le poids n'excède pas deux kilogrammes. On évitera que les cordelettes ne s'emmèlent en les attachant à un cerceau léger de bois, de plastique ou de métal, d'un diamètre approximatif de 40 cm, juste au-dessus du point où elles se rejoignent.

Lorsque le train comprend un réflecteur de radar anémométrique, ce réflecteur peut servir à maintenir écartées les cordelettes du parachute. Celles-ci et leurs attaches doivent pouvoir absorber le choc provoqué par l'ouverture du parachute. Le réflecteur ralentit suffisamment à lui seul la vitesse de chute des radiosondes d'un poids inférieur à 250 g.

10.5 **GAZ UTILISÉS POUR GONFLER LES BALLONS**

10.5.1 **Généralités**

Les deux gaz les mieux adaptés au gonflement des ballons météorologiques sont l'hélium et l'hydro-

gène. Le premier est bien préférable au second car il risque ni de s'enflammer, ni d'exploser, mais son emploi reste l'apanage des rares pays qui disposent de sources d'approvisionnement naturelles abondantes (OMM, *Meteorological Balloons : The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*, Rapport N° 13 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, 1982). La force ascensionnelle (poussée totale) de l'hélium est de $1,115 \text{ kg m}^{-3}$ à une pression de 1 013 hPa et une température de 15° C. Le chiffre correspondant est de $1,203 \text{ kg m}^{-3}$ pour l'hydrogène pur et un peu inférieur pour l'hydrogène du commerce.

Il convient de noter que les conditions générales des contrats d'assurance maritime proscrivent l'emploi de l'hydrogène à bord des navires. On ne peut donc comparer en l'occurrence les mérites respectifs de l'hélium et de l'hydrogène sans prendre en compte le fait que si l'utilisation du premier est à priori plus onéreuse, celle du second est plus dangereuse et qu'il faut y ajouter le surcoût de l'assurance — à supposer qu'on parvienne à en souscrire une.

Abstraction faite du coût et des servitudes du transport, le mieux pour une station météorologique est de se faire livrer le gaz en bouteilles ; si cela se révèle trop coûteux ou impraticable, le recours sur place à un générateur d'hydrogène (section 10.5.3) ne devrait pas présenter de trop grosses difficultés.

10.5.2 Bouteilles de gaz

De manière générale, les plus commodes sont sans doute les bouteilles en acier renfermant 6 m^3 de gaz comprimé à 18 MPa (10 MPa dans les régions tropicales). Toutefois, pour de fortes consommations, ce qui est le cas des stations de radiosondage, il peut s'avérer utile d'utiliser des bouteilles de plus grande capacité ou une batterie de bouteilles reliées à une même sortie afin de limiter le nombre de manipulations. Et afin d'éviter tout risque de confusion, les bouteilles d'hydrogène devront être peintes d'une couleur distinctive (rouge dans nombre de pays) avec un marquage différencié selon la réglementation nationale en vigueur. Les robinets devront être à pas inversé pour les distinguer des bouteilles contenant des gaz non combustibles et protégés par une coiffe de sécurité pendant le transport.

Les bouteilles de gaz devront être contrôlées à intervalles réguliers (entre deux et cinq ans), selon la réglementation nationale en vigueur. Elles devront subir un essai de pression interne d'au moins 50 % supérieure à la pression nominale de service. Les bouteilles d'hydrogène ne doivent pas être exposées à la chaleur, et dans les régions tropicales, elles devront donc être protégées contre les rayons directs

du soleil. Elles seront de préférence entreposées dans un abri bien ventilé pour permettre aux éventuelles fuites d'hydrogène de s'échapper à l'air libre.

10.5.3 Générateurs d'hydrogène

L'hydrogène peut être produit sur site en faisant appel à différents types de générateurs. Tous les générateurs et les installations de stockage de l'hydrogène doivent être lisiblement repérés et les avertissements d'usage clairement marqués selon la réglementation en vigueur (ex. «bouteille contenant de l'hydrogène» ; «Hydrogène – gaz inflammable – Défense de fumer – Éviter les flammes nues»). Les procédés ou mélanges suivants se sont révélés les plus adaptés aux besoins météorologiques :

- a) Ferrosilicium, soude caustique et eau ;
- b) Aluminium, soude caustique et eau ;
- c) Hydrure de calcium et eau ;
- d) Pastilles de fer-magnésium et eau ;
- e) Ammoniaque liquide avec catalyseur de platine chauffé ;
- f) Méthanol et eau avec catalyseur chauffé ;
- g) Électrolyse de l'eau.

La plupart des produits chimiques mis en œuvre dans ces procédés sont dangereux et doivent respecter scrupuleusement les normes et codes de bonne pratique nationaux en vigueur, notamment les consignes de marquage et de mise en garde. Des précautions spéciales doivent être prises en matière de transport, de stockage, de manutention et d'élimination. Nombre d'entre eux sont corrosifs, de même que leurs résidus. Mal contrôlées, leurs réactions peuvent générer un dégagement de chaleur et une pression excessifs. En cas d'ingestion, le méthanol, alcool toxique, peut entraîner la mort, comme cela peut arriver chez les personnes abusant de substances toxiques.

C'est le cas en particulier de la soude caustique, d'un usage pourtant largement répandu. Lors de la manipulation, il convient de prendre toutes les précautions nécessaires, en particulier pour se protéger les yeux et éviter tout contact avec la solution, mais aussi avec la poussière fine qui se dégage lorsqu'on verse le produit sous forme solide dans le générateur. Un flacon rince-œil contenant un agent neutralisant (du vinaigre par exemple) doit être rangé à portée de main en cas d'accident.

Certains des procédés chimiques précités exigent l'application de pressions élevées, d'où un risque plus élevé d'accident. C'est pourquoi les générateurs à haute pression doivent être soumis à des essais tous les deux ans à une pression égale à au moins deux fois la pression de service. Ceux-ci doivent être munis d'un dispositif de sûreté contre les sur-

pressions, généralement un disque de rupture. Il est impératif de suivre les consignes relatives à la taille et à la forme des disques, au matériau utilisé et à la fréquence de remplacement. Même s'il est efficace, le dispositif de sûreté n'empêche pas les éventuelles projections de solution bouillante. Il convient de procéder à un nettoyage minutieux des générateurs à haute pression avant de les recharger, car les résidus de la charge précédente sont susceptibles de réduire considérablement le volume disponible à l'intérieur du générateur et donc d'entraîner une augmentation de la pression de service au-delà de la limite de calcul.

L'hydrure de calcium et le fer-magnésium, qui présentent l'avantage de supprimer l'emploi de la soude caustique, ont malheureusement un coût de fabrication élevé, coût qui pourrait éventuellement être considéré comme acceptable dans des applications très particulières. Ces deux produits libèrent de l'hydrogène en décomposant les molécules d'eau et c'est pourquoi ils doivent être impérativement stockés dans des conteneurs parfaitement étanches à l'humidité. Dans les procédés catalytiques, des mesures devront être prises pour éviter toute contamination des catalyseurs.

Tous ces procédés fournissent du gaz à une pression suffisante pour le remplissage des ballons. Toutefois, le rythme de production de certains (électrolyse en particulier) est si lent qu'il faut produire du gaz à l'avance et le stocker soit sous une forme comprimée, soit dans un réservoir.

Les procédés fondés sur l'électrolyse de l'eau ou le craquage catalytique du méthanol semblent intéressants car ils sont relativement sûrs, avec des coûts récurrents de fabrication modérés, et les matériaux employés sont non corrosifs. Ces deux procédés, ainsi que le procédé à base d'ammoniaque liquide, font appel au courant électrique. Le matériel est de conception assez complexe et doit faire l'objet d'un entretien et de procédures de contrôle destinées à vérifier que les systèmes de sécurité fonctionnent correctement sur une base quotidienne. L'eau d'électrolyse doit posséder une faible teneur en minéraux.

10.6 PRÉCAUTIONS À PRENDRE DANS L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE

10.6.1 Généralités

Une petite étincelle suffit à enflammer l'hydrogène qui se consume en produisant une flamme presque invisible. Il brûle à des concentrations dans l'air allant de 4 à 74 % en volume (NFPA, 1999), et explose

à des concentrations comprises entre 18 et 59 %. Dans les deux cas, il peut infliger aux personnes qui se trouvent à proximité de graves brûlures sur toutes les parties exposées de leur corps et la déflagration peut blesser grièvement l'opérateur en le projetant contre un mur ou au sol.

Les risques d'accident peuvent être évités en mettant en place des procédures et un matériel adaptés, à condition de prendre les mesures nécessaires pour les faire respecter et de veiller au bon entretien des équipements (Gremia, 1977 ; Lüdtke et Saraduke, 1992; NASA, 1968). On n'accorde pas toujours assez d'attention aux problèmes de sécurité à l'intérieur des bâtiments dans lesquels est fabriqué et stocké l'hydrogène, ou sur les aires de gonflage et de lancer de ballons (voir section suivante). Il convient notamment mettre en place des formations poussées et procéder à une surveillance et un contrôle méticuleux des personnels et des installations pour s'assurer du respect des procédures.

Le point fort des lanceurs automatiques de ballons (voir section 10.3.4) réside dans le fait qu'ils ne présentent pratiquement aucun danger pour les opérateurs dans la mesure où ces derniers ne se situent pas à proximité de l'hydrogène.

Les normes et codes de bonne pratique nationaux relatifs à la prévention des risques en atmosphère explosive constituent un bon point de départ pour étudier les précautions à prendre avec l'hydrogène. Par ailleurs, on peut également se reporter aux publications qui traitent de ce problème dans les blocs opératoires des hôpitaux et les locaux industriels exposés à des risques analogues. Un opérateur ne doit jamais se trouver dans un local fermé en présence d'un ballon gonflé. Les différents paragraphes du présent chapitre donnent quelques consignes relatives aux questions de sécurité.

10.6.2 Conception des bâtiments

Des mesures devront être prise pour éviter toute accumulation d'hydrogène à l'état libre et de charges électrostatiques, ainsi que le risque d'étincelles, dans les locaux où l'on fabrique, stocke et utilise de l'hydrogène, et ce même lorsqu'un ballon éclate pendant le gonflage (OMM, *Meteorological Balloons: The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*, Rapport N° 13 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, 1982).

La sécurité doit entrer en ligne de compte dans l'architecture des bâtiments (NFPA, 1999 ; SAA, 1985). Mais ce sont les conditions climatiques, ainsi que les normes et codes nationaux qui dictent ce qu'il est possible de faire en matière de conception et de

matériaux pour la construction de bâtiments sûrs, protégés contre les risques liés à l'hydrogène. Les codes n'ont qu'une valeur consultative et servent de base à la mise en place de bonnes pratiques. Les normes sont publiées sous la forme de spécifications techniques relatives aux matériaux, produits et pratiques sûres. Elles traitent notamment des matériaux d'éclairage ignifuges, des appareils électriques en atmosphère explosive, de la ventilation des locaux en atmosphère explosive, et l'emploi de vitrage plastique, de disques de rupture, etc. (WMO, *Meteorological Balloons : The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*, Rapport N° 13 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, 1982).

Les normes et les codes peuvent fournir des informations utiles relatives à la conception des bâtiments exposés aux risques liés à l'hydrogène. Ceux-ci doivent en outre être en cohérence avec les pratiques nationales recommandées. Il convient de consulter les organismes nationaux de normalisation lors de la conception de ces bâtiments ou de la révision des règles de sécurité dans les bâtiments existants, en particulier sur les points suivants :

- a) Emplacement recommandé des systèmes d'alimentation en hydrogène ;
- b) Résistance au feu des matériaux envisagés : classes de résistance au feu à respecter ;
- c) Ventilation, notamment construction d'une toiture légère pour permettre l'évacuation de l'hydrogène et des produits d'explosion par le point le plus haut du bâtiment ;
- d) Matériel et câbles électriques ;
- e) Protection incendie (extincteurs et alarmes) ;
- f) Dispositions à prendre pour permettre à l'opérateur de contrôler le gonflage du ballon depuis l'extérieur.

Des mesures devront être prises pour réduire au minimum les risques d'étincelles dans les locaux où l'on manipule de l'hydrogène. Ainsi, tout le matériel électrique (interrupteurs, prises, câbles) devra être monté à l'extérieur des locaux concernés. À défaut, il conviendra de prévoir des interrupteurs anti-étincelles et des câbles pressurisés. Il est également recommandé de faire appel à la lumière du jour pour éclairer les locaux en installant des fenêtres. Pour les mêmes raisons, tous les outils utilisés devront être à l'épreuve des étincelles. Les chaussures des opérateurs ne devront pas non plus produire d'étincelles. Il faudra également prévoir une protection contre la foudre.

Si un système d'extinction automatique a été installé dans une partie du bâtiment, il faudra étudier les éventuels risques de fuite d'hydrogène par cette voie une fois éteint l'incendie. Il existe des systèmes de

détection d'hydrogène qui peuvent être utilisés pour couper l'alimentation du générateur d'hydrogène et déclencher une alarme lorsque la concentration de l'hydrogène dans l'air atteint 20 % du seuil inférieur d'explosion, puis une seconde alarme à 40 %.

Il conviendra de définir une zone de risque autour du générateur, des aires de stockage des bouteilles d'hydrogène et de gonflage du ballon, dans laquelle le port de vêtements de protection sera rendu obligatoire (voir section 10.6.4).

Les lanceurs automatiques (voir section 10.3.4) permettent en général d'éviter d'avoir à recourir à un local spécial pour le gonflage des ballons, ce qui simplifie beaucoup la conception des installations d'hydrogène.

10.6.3 Électricité statique

On peut considérablement réduire les risques liés au gonflage et au lancer des ballons en prenant des mesures contre l'apparition de charges électrostatiques dans la salle de gonflage, sur les vêtements des opérateurs et le ballon lui-même. Loeb (1958) fournit des informations sur le processus d'électrisation. On peut contrôler ce phénomène par une mise à la terre du matériel d'alimentation en hydrogène et autres équipements et en dotant les opérateurs d'un bracelet de protection contre les décharges générées par leurs vêtements (OMM, *Meteorological Balloons: The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*, Rapport N° 13 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, 1982).

Les charges sur les ballons sont plus difficiles à éliminer. Les matériaux dont sont faits ces derniers, en particulier le latex pur, constituent de très bons isolants. Les charges électrostatiques naissent de la rupture du contact entre deux matériaux isolants. Un seul effleurement avec les vêtements ou les cheveux de l'opérateur peut engendrer une charge de 20 kV, plus que suffisante pour enflammer un mélange d'air et d'hydrogène si elle se décharge sous la forme d'une étincelle très incandescente. Les charges accumulées sur un ballon peuvent mettre de nombreuses heures à se dissiper dans la terre ou naturellement dans l'air environnant. On a aussi constaté que quand un ballon explosait les déchirures de l'enveloppe pouvaient produire des étincelles assez fortes pour provoquer un embrasement.

Il est possible de résorber les charges électrostatiques ou d'en prévenir la formation sur le ballon en pulvérisant de l'eau ou en projetant un jet d'air ionisé sur l'enveloppe pendant le gonflage, en la trempant dans une solution antistatique (avec ou sans séchage

avant le lancer) ou en utilisant des engins dont le latex contient un additif antistatique; mettre le col à la terre ne suffit pas.

Le potentiel électrostatique maximal qui peut se former ou subsister à la surface d'un ballon décroît en raison inverse de l'humidité, mais on ne sait pas au juste dans quelle proportion. Certains essais effectués avec des ballons gonflés de 20 g indiquent que des étincelles assez puissantes pour enflammer un mélange d'hydrogène et d'oxygène ne pouvaient probablement pas jaillir lorsque l'humidité relative de l'air ambiant était supérieure à 60 %. D'autres études semblent indiquer que le seuil acceptable de sécurité se situerait entre 50 et 76 % d'humidité, tandis que d'autres encore montrent que des étincelles restent à craindre même au-delà de ces valeurs. Ceci laisse à penser qu'on pourrait ne plus craindre l'apparition de charges électrostatiques au-delà de 70 %, mais une telle conclusion demeure sujette à caution (voir Cleves, Sumner et Wyatt, 1971).

Pulvériser de l'eau sur l'enveloppe est vivement recommandé parce que l'humidification et la mise à terre du ballon débarrassent ses parties mouillées de la plus grande part des charges électrostatiques. La zone mouillée doit être la plus étendue possible et l'eau s'écouler en filets continus jusqu'au sol. Si les portes restent fermées, le taux d'humidité relative dans la salle de gonflement peut atteindre au minimum 75 % et la probabilité que jaillissent des étincelles assez puissantes pour enflammer le gaz diminue. Il convient de lancer le ballon dès l'arrêt de la pulvérisation et l'ouverture des portes.

On peut aussi lutter contre l'accumulation de charges électrostatiques par les voies suivantes (OMM, *Meteorological Balloons: The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*, Rapport N° 13 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, 1982) :

- Dotter le bâtiment d'un système complet de mise à la terre : relier séparément tous les accessoires, le matériel d'alimentation en hydrogène

et le conducteur du paratonnerre à une même prise de terre, elle-même conforme aux normes nationales en vigueur; ne pas oublier de purger le plancher de ses charges électrostatiques ;

- installer des postes de décharge électrostatique pour les observateurs ;
- enduire régulièrement les fenêtres d'une solution antistatique ;
- inciter les opérateurs à ne pas porter de vêtements en tissu synthétique ni de chaussures isolantes (il est bon de les munir de souliers à semelles semi-conductrices) ;
- réduire au minimum les contacts entre les opérateurs et le ballon, par exemple en installant la station de gonflement à un mètre ou plus au-dessus du sol.

10.6.4

Tenues de protection et poste de premier secours

Le port de vêtements de protection adaptés est recommandé à toutes les étapes de la procédure, de la production de l'hydrogène et la manutention des bouteilles au gonflement et au lâcher de ballons. La tenue comprend une combinaison légère ignifugée dotée d'une cagoule fabriquée dans un matériau antistatique non synthétique couvrant aussi le bas du visage, des lunettes ou un masque, des gants en coton et tout vêtement ininflammable recommandé localement (voir Hoschke *et al.*, 1979).

Il est recommandé de mettre en place un poste de premiers secours adapté à l'installation, doté d'une trousse permettant de dispenser les premiers soins en cas de brûlure ou de fracture. Dès lors que des produits chimiques sont employés, il convient d'avoir à portée de main des solutions neutralisantes adaptées, de l'acide citrique par exemple pour traiter les brûlures à la soude caustique. Un appareil rince-œil devra également être mis à disposition pour permettre une intervention immédiate (OMM, *Meteorological Balloons : The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*, Rapport N° 13 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, 1982).

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Atmospheric Environment Service (Canada), 1978 : *The Use of Hydrogen for Meteorological Purposes in the Canadian Atmospheric Environment Service*, Toronto.
- Cleves, A.C., J.F. Sumner et R.M.H. Wyatt, 1971 : The Effect of Temperature and Relative Humidity on the Accumulation of Electrostatic Charges on Fabrics and Primary Explosives. *Proceedings of the Third Conference on Static Electrification*, Londres.
- Gremia, J.O., 1977 : *A Safety Study of Hydrogen Balloon Inflation Operations and Facilities of the National Weather Service*, Trident Engineering Associates, Annapolis, Maryland.
- Hoschke, B.N., et al., 1979 : *Report to the Bureau of Meteorology on Protection Against the Burn Hazard from Exploding Hydrogen-filled Meteorological Balloons*, CSIRO Division of Textile Physics and the Department of Housing and Construction, Australie.
- Loeb, L.B., 1958 : *Static Electrification*, Springer-Verlag, Berlin.
- Ludtke, P. et G. Saraduke, 1992 : *Hydrogen Gas Safety Study Conducted at the National Weather Service Forecast Office*, Norman, Oklahoma.
- National Aeronautics and Space Administration, 1968 : *Hydrogen Safety Manual*, NASA Technical Memorandum TM-X-52454, NASA Lewis Research Center, États Unis.
- National Fire Protection Association, 1999 : *NFPA 50A : Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites*, éd. 1999, National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- National Fire Protection Association, 2002 : *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations*, éd. 2002, National Fire Protection Association, Batterymarch Park, Quincy, Maryland.
- National Fire Protection Association, 2005 : *NFPA 70, National Electrical Code*, éd. 2005, National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- National Fire Protection Association, 2006 : *NFPA 220, Standard on Types of Building Construction*, éd. 2006, National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- Rosen, B., V.H. Dayan et R.L. Proffit, 1970 : *Hydrogen Leak and Fire Detection : A Survey*. NASA SP-5092.
- Standards Association of Australia, 1970 : AS C99 : *Electrical equipment for explosive atmospheres – Flame-proof electric lightning fittings*.
- Standards Association of Australia, 1980 : AS 1829 : *Intrinsically safe electrical apparatus for explosive atmospheres*.
- Standards Association of Australia, 1985 : AS 1482 : *Electrical equipment for explosive atmospheres – Protection by ventilation – Type of protection V*.
- Standards Association of Australia, 1995 : ASNZS 1020 : *The control of undesirable static electricity*.
- Standards Association of Australia, 2004 : AS 1358 : *Bursting discs and bursting disc devices – Application selection and installation*.
- World Meteorological Organization, 1982 : *Meteorological Balloons : The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*, Rapport N° 13 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, Genève.

CHAPITRE 11

OBSERVATIONS URBAINES

11.1 GÉNÉRALITÉS

La nécessité de mettre en place des observations météorologiques en ville se fait chaque jour plus pressante. Les populations urbaines ne cessent de croître et les Services météorologiques sont de plus en plus souvent sollicités pour fournir les données météorologiques qui viendront alimenter les prévisions détaillées à l'intention des citoyens ou susceptibles d'être utiles dans les domaines de la construction et de l'urbanisme, des économies d'énergie, des transports et des communications, de la qualité de l'air et de la santé, de l'ingénierie hydraulique liée aux eaux de ruissellement et l'ingénierie éolienne, ainsi que dans le domaine de l'assurance et des mesures d'urgence. Dans le même temps, les Services météorologiques rencontrent des difficultés à réaliser des observations urbaines qui ne soient pas gravement remises en cause. En effet, dans la plupart des sites urbanisés, il s'avère impossible de respecter les directives normalisées relatives à la sélection des sites et l'exposition des instruments présentées dans la partie I du présent Guide en raison de l'obstruction à l'écoulement d'air et aux échanges radiatifs imputable à la présence de bâtiments et d'arbres, d'un couvert superficiel artificialisé, de rejets thermiques et de vapeur d'eau d'origine anthropique.

Le présent chapitre fournit des informations qui permettront de sélectionner des sites, d'installer une station météorologique et d'interpréter les données relevées en zone urbaine. Il traite en particulier le cas d'une station climatologique dite standard. En dépit de la complexité et de l'hétérogénéité des milieux urbains, il est possible d'effectuer des observations utiles et reproductibles. Chaque site constitue un défi unique. Il convient de s'intéresser de près à certains principes et concepts pour ainsi dire uniques en agglomération pour pouvoir obtenir des résultats d'observation intéressants. En outre, les personnes chargées d'implanter et de gérer la station devront appliquer ces principes et concepts avec souplesse et intelligence afin de tenir compte des réalités et des spécificités du milieu observé, la mise en œuvre de règles strictes étant difficilement applicable. Cette nécessaire souplesse entre en légère contradiction avec la notion générale de standardisation prônée par l'OMM en termes de pratiques d'observation. Dans les zones urbaines, il faut parfois accepter une exposition au-dessus de surfaces et à des hauteurs non normalisées, de répartir les observations sur deux ou plusieurs sites,

ou de s'approcher plus près que d'habitude des bâtiments et des sources de rejets thermiques.

Les unités de mesure et les instruments utilisés en zone urbaine sont les mêmes que ceux employés dans les autres milieux. En conséquence, seuls les aspects spécifiques à la ville, ou difficiles à gérer en raison de la nature de la cité concernée, tels que le choix du site, l'exposition des instruments et la documentation relative aux métadonnées, seront examinés dans ce chapitre.

Les heures et la fréquence des observations, comme le chiffrement des messages, devront respecter les normes en vigueur (OMM : *Guide des pratiques climatologiques*, 1983; *Règlement technique*, 1988; *Manuel des codes*, 1995; *Guidelines on Metadata and Homogenization*, 2003a; *Manuel du Système mondial d'observation*, 2003b; *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at urban sites*, 2006).

Il conviendra de suivre les recommandations du chapitre 1 de la partie II relatives aux stations automatiques et aux exigences de chiffrement et de transmission des messages, au contrôle qualité, à la maintenance (noter les besoins spécifiques du milieu urbain) et à l'étalonnage.

11.1.1 Définitions et concepts

11.1.1.1 Principe de fonctionnement d'une station

Les raisons de la création d'une station urbaine doivent être clairement motivées pour en garantir le succès. Les deux points les plus fréquemment soulignés sont la volonté de représenter l'environnement météorologique en un lieu donné à des fins climatologiques et de fournir des données susceptibles de répondre aux besoins d'un utilisateur particulier. Dans les deux cas, il convient de définir des échelles spatio-temporelles utiles, mais comme expliqué dans les paragraphes suivants, l'implantation de la station et l'exposition des instruments peuvent différer significativement d'un cas à l'autre.

11.1.1.2 Échelles horizontales

Rien n'est plus important que de bien appréhender le concept d'échelle pour assurer le bon fonctionnement d'une station. On dénombre trois grandes échelles (Oke, 1984 ; figure 11.1) :

- a) *Micro-échelle* : elle permet de distinguer le mi-

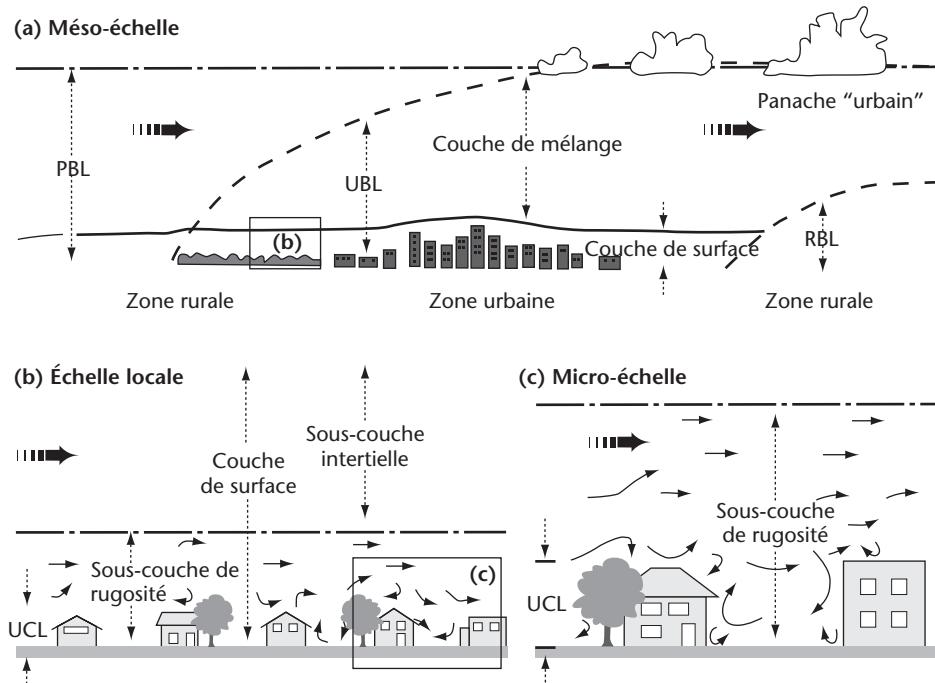


Figure 11.1. Schéma des échelles climatiques et des couches verticales présentes dans les zones urbaines : couche limite planétaire (PBL), couche limite urbaine (UBL), couche du couvert urbain (UCL), couche limite rurale (RBL) (modification de Oke, 1997)

croclimat qui existe au niveau de chaque surface ou objet et de son environnement immédiat. La température de la surface et la température de l'air peuvent varier de plusieurs degrés à faible distance, limitée parfois à quelques millimètres seulement, et l'écoulement de l'air peut être sérieusement perturbé par le moindre objet. Les échelles types correspondant aux microclimats urbains tiennent compte de la dimension des bâtiments, des arbres, des routes, des rues, des cours, des jardins, etc. Elles s'étendent de moins d'un mètre à quelques centaines de mètres. Les directives énoncées dans la partie I du présent Guide visent plus particulièrement à éviter les effets microclimatiques. Les recommandations relatives aux stations climatologiques sont destinées, dans la mesure du possible, à normaliser les conditions d'observation sur l'ensemble des sites. C'est pourquoi on s'appuie sur une hauteur standard de mesure, un couvert unique, des distances minimales à respecter par rapport aux obstacles et une faible obstruction de l'horizon. L'objectif est de réaliser des observations exemptes de signaux parasites liés au développement de microclimats et de pouvoir ainsi décrire les climats locaux. Si l'on adopte des normes encore plus sévères, les stations de premier ordre pourront représenter les conditions météorolo-

giques à l'échelle spatio-temporelle synoptique. Il sera possible d'exploiter les données obtenues pour évaluer les tendances climatiques à échelle plus grande encore. Les stations urbaines devraient éviter ces influences microclimatiques, sauf objectif particulier bien défini, mais ceci est difficilement réalisable ;

b) *Échelle locale* : elle correspond à l'échelle pour laquelle sont conçues les stations météorologiques standards. Elle prend en compte les particularités du paysage, par exemple la topographie, mais exclut les effets à micro-échelle. Dans le cas d'une zone urbaine, elle correspond au climat moyen de parcelles voisines présentant le même type d'urbanisation (couvert superficiel, taille et espacement des bâtiments, activité). Le signal intègre un ensemble caractéristique d'effets microclimatiques émanant d'une zone source à proximité du site. La zone source est une portion de la surface en amont qui contribue aux principales propriétés de flux ou de concentration de variables météorologiques mesurés (Schmid, 2002). Les échelles types s'étendent d'un à plusieurs kilomètres ;

c) *Méso-échelle* : la ville a une influence sur le temps et le climat à l'échelle de l'agglomération toute entière, généralement sur des dizaines de kilomètres. Une station unique ne peut pas représenter une telle échelle.

11.1.1.3 Échelles verticales

La différence essentielle entre le climat des zones urbaines et celui des zones rurales, ou des aéroports, tient au fait qu'en ville, les échanges verticaux de quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité n'interviennent pas sur une surface (quasi) plane, mais dans une couche d'épaisseur non négligeable, appelée couche de canopée urbaine (figure 11.1). La hauteur de la canopée urbaine est approximativement équivalente à la hauteur moyenne des principaux éléments de rugosité (bâtiments et arbres), z_H (voir la définition des paramètres en figure 11.4). Les effets microclimatiques liés aux différents obstacles et surfaces persistent sur une courte distance par rapport à leur source pour ensuite se mélanger et s'atténuer sous l'action des tourbillons de turbulence. La distance nécessaire pour que l'effet s'annule dépend de son ampleur, de la vitesse et de la stabilité du vent (stable, neutre, instable). Ce mélange intervient tant dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Comme nous l'avons déjà noté, les effets horizontaux peuvent persister sur quelques centaines de mètres. Dans le plan vertical, on peut discerner les effets des différents éléments dans la sous-couche de rugosité, qui s'étend du sol à la hauteur de mélange z_r . Les estimations approximatives et les mesures sur le terrain indiquent que la valeur de z_r peut descendre jusqu'à 1,5 z_H sur des sites homogènes à forte densité de bâti (constructions très rapprochées) mais être supérieure à 4 z_H pour des sites à faible densité (Grimmond et Oke, 1999 ; Rotach, 1999 ; Christen, 2003). Un instrument placé en-dessous de z_r peut relever des anomalies microclimatiques, mais au-dessus il «voit» un écoulement mélangé et moyenné spatialement, représentatif de l'échelle locale.

Il convient d'examiner un autre problème susceptible de restreindre encore le choix d'un site en termes de hauteur. En effet, chaque type de surface à l'échelle locale génère une couche limite interne, la structure de l'écoulement et les propriétés thermodynamiques observées à ce niveau correspondant à ce type de surface. La hauteur de la couche augmente avec le fetch (distance au vent à partir de la transition prise pour origine avec un autre type de surface). La vitesse à laquelle la couche limite interne se développe avec le fetch dépend de la rugosité et de la stabilité. En milieu rural, les rapports hauteur/fetch peuvent varier de 1:10 par vent instable à 1:500 par vent stable, et ce rapport diminue à mesure que la rugosité augmente (Garratt, 1992; Wieringa, 1993). Les zones urbaines tendent vers une stabilité neutre en raison d'une turbulence thermique et mécanique renforcée liée au phénomène d'ilot de chaleur et à leur forte rugosité. En conséquence, on considère que le rapport hauteur/fetch type est environ égal à 1:100. La hauteur de la couche limite interne est

prise au-dessus de la hauteur de déplacement z_d , qui correspond au niveau de référence du flux au-dessus de la hauteur de mélange (l'explication de z_d est donnée en figure 11.4 et dans la note 2 du tableau 11.2).

Par exemple, si l'on prend l'hypothèse d'un quartier à forte densité de bâti avec une hauteur z_H de 10 m, alors z_r devra être au moins égal à 15 m. Si on choisit cette hauteur comme niveau de mesure, le fetch dans une zone urbaine similaire devrait atteindre au moins 0,8 km, étant donné que le fetch est égal à 100 ($z_r - z_d$), et z_d environ 7 m. Cela risque de considérablement réduire le choix du site, car si la taille de la zone urbaine autour du site d'implantation de la station n'est pas au moins similaire à cette distance, les observations ne seront pas représentatives du type de surface locale. Dans les sites à plus faible densité d'urbanisation, où les effets liés à l'ilot de chaleur et à la rugosité sont moindres, le fetch devra probablement être plus important.

À des altitudes supérieures à la hauteur de mélange, mais à l'intérieur de la couche limite interne locale, les mesures sont réalisées dans la sous-couche en équilibre (figure 11.1), pour laquelle la théorie de la couche limite s'applique. Cette théorie régit la forme des profils verticaux moyens des variables météorologiques (notamment la température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent), le comportement des flux turbulents, les spectres et les statistiques. Elle sert de base :

- a) Au calcul de la zone source (ou «empreinte», voir ci-dessous) du flux turbulent ou de la concentration d'une variable météorologique, lequel permet donc de définir la distance en amont pour un fetch minimum acceptable ;
- b) À l'extrapolation d'un flux ou d'une propriété donnée dans la couche d'équilibre et en aval à l'intérieur de la couche de rugosité (et, même si cela est moins fiable, à l'intérieur de la canopée urbaine). Au niveau de la couche en équilibre, les flux sont constants, la hauteur et la valeur moyenne des propriétés météorologiques ne varient pas dans le sens horizontal. En conséquence, les observations des flux et des variables standards sont d'une grande utilité et permettent de caractériser le milieu sous-jacent à l'échelle locale. L'extrapolation à l'intérieur de la sous-couche de rugosité est moins souvent prescrite.

11.1.1.4 Zones sources («empreintes»)

Un détecteur placé au-dessus d'une surface ne «voit» qu'une portion de son environnement, dénommée «zone source» de l'instrument, laquelle dépend du positionnement de ce dernier en altitude et des caractéristiques du processus de transport entre les

deux. Pour les signaux de rayonnement ascendant (rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde et température de la surface vus par un thermomètre à infrarouge), le champ de vision de l'instrument et la géométrie de la surface sous-jacente déterminent ce que l'instrument voit. Par analogie, les détecteurs tels que les thermomètres, hygromètres, analyseurs de gaz et anémomètres «voient» des propriétés telles que la température, l'humidité, les gaz atmosphériques, la vitesse et la direction du vent qui sont transmis de la surface au détecteur par le transport turbulent. Une illustration théorique de ces zones sources est présentée figure 11.2.

La zone source d'un radiomètre pointé vers le bas, l'élément sensible étant orienté parallèlement au sol, est une parcelle circulaire au centre de laquelle est placé l'instrument (figure 11.2). Le rayon (r) de la zone source circulaire contribuant au signal du radiomètre à la hauteur (z_1) est donné par Schmid *et al.* (1991) :

$$r = z_1 \left(\frac{1}{F} - 1 \right)^{-0.5} \quad (11.1)$$

Où F est le facteur de forme, à savoir la proportion de flux mesuré au niveau du détecteur émis par cette zone. En fonction de son champ de vision, le radio-

mètre ne peut voir qu'un cercle limité ou étendre sa vision jusqu'à l'horizon. Dans ce dernier cas, l'instrument fournit un signal cosinusoïdal, de telle sorte que vers l'horizon, il devient de plus en plus difficile de définir la véritable zone source vue. D'où l'utilisation du facteur de forme qui définit la zone contribuant à une portion définie (souvent fixée à 50, 90, 95, 99 ou 99,5 pour cent) du signal de l'instrument.

La zone source d'un capteur, qui dérive son signal de l'observation du transport turbulent, n'est pas distribuée symétriquement autour de celui-ci. Elle présente une forme elliptique dans le sens opposé au vent à partir de la tour (figure 11.2). Par conditions ventées, l'effet de l'aire de surface à la base du mât est effectivement nul, car la turbulence ne peut pas transporter son influence jusqu'au niveau du capteur. À une certaine distance au vent, la source commence à affecter le capteur ; cet effet atteint un pic avant de décroître à des distances plus grandes (pour la forme des variations dans le sens des x et des y , voir Kljun, Rotach et Schmid, 2002 ; Schmid, 2002). La distance au vent jusqu'à la première surface contribuant au signal, au point du pic d'influence, à la surface au vent la plus éloignée ayant une incidence sur la mesure, et à la zone dite «d'empreinte», varie considérablement avec le temps. Elle dépend de l'altitude à laquelle la mesure est réalisée (plus importante aux

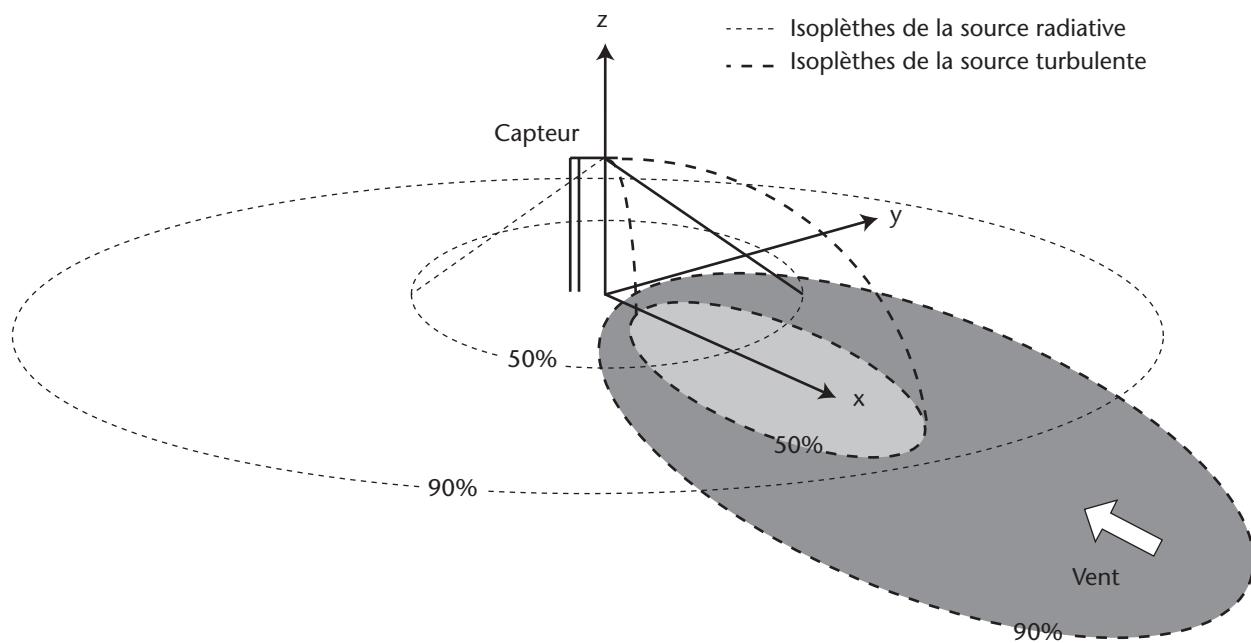


Figure 11.2.

Représentation conceptuelle des zones d'origine contribuant à envoyer vers les capteurs des rayonnements et des flux turbulents de concentrations. Si le capteur est un radiomètre, 50 à 90 pour cent du flux provient de la zone située à l'intérieur des cercles correspondants. Si le capteur répond à une propriété du transport turbulent, 50 à 90 pour cent du signal provient de la zone située à l'intérieur des ellipses correspondantes. Ces flux sont dynamiques au sens où ils sont orientés par le vent et se déplacent donc selon la direction et la stabilité du vent.

altitudes plus élevées), de la rugosité de la surface, de la stabilité atmosphérique (augmente à mesure que l'on passe de conditions instables à stables) et de la mesure éventuelle d'un flux turbulent ou de la concentration de variables météorologiques (plus importante pour la concentration) (Kljun, Rotach et Schmid, 2002). Il existe des méthodes pour calculer les dimensions des «empreintes» de flux et de concentration (Schmid, 2002 ; Kljun *et al.*, 2004).

La situation illustrée en figure 11.2 représente le cas général, mais elle s'applique surtout aux instruments placés dans la sous-couche en équilibre, bien au-dessus des complications que peuvent provoquer la sous-couche de rugosité et la géométrie complexe de la surface en trois dimensions d'une zone urbaine. Au niveau de la canopée urbaine, aucune évaluation fiable de la diminution des effets des zones sources de rayonnement et de turbulence avec la distance n'a encore été réalisée. On peut supposer que ces derniers dépendent des mêmes propriétés et présentent des formes générales similaires à celles illustrées en figure 11.2. Toutefois, on observe des complications évidentes dues à la géométrie complexe du rayonnement, ainsi qu'au blocage et à la canalisation des flux, lesquels caractérisent la canopée urbaine. Il est évident que l'environnement immédiat de la station est de loin le paramètre le plus déterminant et l'étendue de la zone source des effets convectifs augmente avec la stabilité du vent et l'altitude du détecteur. La distance ayant une incidence sur les détecteurs au niveau de l'abri (~1,5 m) peut être égale à quelques dizaines de mètres en conditions neutres, inférieure à cette valeur en conditions instables, et sans doute supérieure à 10 m en conditions stables. À 3 m de hauteur, les distances équivalentes peuvent probablement atteindre 300 m environ pour un vent stable. On estime que le rayon du cercle d'influence sur un détecteur de température ou d'humidité au niveau de l'abri est généralement égal à environ 0,5 km, mais cela dépend sans doute de la densité du bâti.

11.1.1.5 Méthodes de mesure

Il ressort de la discussion précédente que, si l'objectif d'un site urbain instrumenté est de surveiller le climat à l'échelle locale à proximité de la surface, deux stratégies offrent de bonnes chances de pouvoir y parvenir, à savoir :

- Implanter le site dans la canopée urbaine dans un endroit environné de conditions moyennes ou «types» pour le milieu urbain, et placer les capteurs à des hauteurs similaires à celles utilisées pour des sites non urbains. On suppose alors que le mélange induit par le flux généré autour des obstacles est suffisant pour mélan- ger les propriétés et former une couche moyen- ne de canopée urbaine au niveau local ;

- Installer les capteurs sur une tour élevée au-dessus de la sous-couche de rugosité pour obtenir des valeurs de mélange susceptibles d'être extrapolées à la canopée urbaine.

En général, la stratégie a) donne de meilleurs résultats pour mesurer la température de l'air et l'humidité et la stratégie b) pour mesurer la direction et la vitesse du vent, ainsi que les précipitations. Un horizon dégagé constitue la seule exigence importante en matière de rayonnement. En conséquence, les stations urbaines se limitent souvent à des instruments déployés en-dessous et au-dessus du niveau des toits, ce qui implique que l'évaluation et la description du site prennent en compte les échelles correspondant à ces deux cas de figure.

11.1.1.6 Description d'un site urbain

La taille de chaque échelle urbaine ne correspond pas avec exactitude à celle généralement donnée dans les manuels. Les échelles sont attribuées selon les dimensions des éléments morphométriques qui caractérisent un paysage urbain. L'accent est ainsi mis sur la nécessité de décrire correctement les propriétés des zones urbaines qui ont une incidence sur l'atmosphère. Les paramètres de base les plus importants sont la structure urbaine (taille des bâtiments, espaces entre les bâtiments, largeur de la rue et espace-ment entre les rues), le couvert urbain (zones bâties, revêtues et végétalisées, sol nu, surfaces d'eau), le tissu urbain (bâti et éléments naturels) et le métabolisme urbain (chaleur, eau et pollution d'origine anthropique). En conséquence, il convient de prendre en compte ces descripteurs pour définir les sites d'implantation des stations de climatologie urbaine, sélectionner les sites potentiels et les intégrer dans les métadonnées destinées à décrire avec précision l'implantation d'une station.

Les classes urbaines caractéristiques sont généralement définies à partir d'une combinaison de ces quatre paramètres de base. Par exemple, l'hyper-centre des villes se caractérise par des bâtiments relativement élevés, très proches les uns des autres, de sorte que le sol est largement occupé par des bâtiments ou des surfaces revêtues, construits en matériaux durables tels que la pierre, le béton, la brique et l'asphalte, et par d'importants rejets dus aux appareils de chauffage et de climatisation, aux cheminées et au trafic automobile. De l'autre côté de l'éventail, on trouve des quartiers à faible densité de bâti, avec des bâtiments d'un ou deux étages de construction relativement légère, entourés de grands jardins ou espaces verts, où les rejets thermiques sont faibles, mais les besoins en matière d'irrigation probablement importants.

Il n'existe aucun système universellement accepté de classification urbaine à des fins climatologiques. La typologie des différentes formes de zones urbaines mise au point par Ellefsen (1991) constitue néanmoins une bonne approche. Il distingue d'abord trois types de contiguïté dans le bâti (contigu (rangée), détaché-fermé et détaché-ouvert), lesquels sont ensuite divisés en 17 sous-types selon leur fonction et leur localisation dans la ville, la hauteur des bâtiments, le type de construction et leur âge. Il suffit de disposer d'une photographie aérienne, généralement disponible, pour mettre en œuvre un tel système. Ce dernier a été adopté dans plusieurs villes à travers le monde et semble revêtir un caractère général.

On peut utiliser le système mis au point par Ellefsen pour décrire la structure urbaine en termes de rugosité, d'écoulement d'air, d'exposition ou d'obstacle au rayonnement. On peut affirmer que celui-ci comprend indirectement des aspects du couvert, du tissu et du métabolisme urbains car chaque structure se caractérise en effet par un certain type de couvert, de matériaux et d'activité humaine. La typologie d'Ellefsen s'avère toutefois moins utile lorsque les éléments de bâti sont rares et en présence de zones végétalisées importantes (forêt urbaine, couvert végétal ras, prairie, broussailles, cultures), d'un sol nu (sol proprement dit ou roche) et de surfaces d'eau (lacs, marécages, rivières). Une typologie simple des zones climatiques urbaines est présentée dans le tableau 11.1. Elle comprend les groupes de zones définies par Ellefsen, plus une mesure de la structure, z_H/W (voir tableau 11.1, note c) qui s'avère étroitement liée à l'écoulement, aux phénomènes d'ombrage et d'ilôt de chaleur, ainsi qu'une mesure du couvert (% de bâti) par rapport au degré de perméabilité de la surface.

Cette classification précise des zones climatiques urbaines est particulièrement utile, non pas tant pour décrire un site que pour permettre une classification des différentes zones urbanisées en quartiers dotés de caractéristiques similaires en termes d'influence sur le climat local, ainsi que le repérage d'éventuelles transitions entre ces zones. Il est donc primordial de procéder à une telle classification avant toute implantation d'une station urbaine afin de pouvoir approximativement satisfaire aux critères d'homogénéité spatiale qui président au déploiement d'une station dans la couche de canopée urbaine ou au-dessus de la sous-couche de rugosité. On suppose ci-après que la morphométrie de tout ou partie de la zone urbaine a été évaluée à partir de cartes détaillées et/ou de photographies aériennes, d'images satellites (visibles et/ou thermiques), de documents d'urbanisme ou au moins d'une analyse visuelle réalisée à partir d'un véhicule ou à pied. Même si les cartes d'occupation des sols

peuvent présenter un intérêt, il serait souhaitable qu'elles illustrent la fonction et pas nécessairement la forme physique de l'espace bâti. La description d'un milieu urbain doit en principe viser à établir une carte sur laquelle les différentes zones climatiques urbaines sont délimitées.

Le présent document s'appuie sur les zones climatiques urbaines présentées au tableau 11.1. Les catégories proposées peuvent être adaptées pour tenir compte des formes urbaines particulièrement caractéristiques de cités anciennes ou d'un développement urbain anarchique tel qu'on le rencontre dans certains pays moins développés. Par exemple, nombre d'agglomérations en Afrique et en Asie n'ont pas une proportion aussi importante de surfaces recouvertes de matériaux imperméables et les routes ne sont pas toujours asphaltées.

11.2 CHOIX DE L'EMPLACEMENT ET DU SITE POUR IMPLANTER UNE STATION URBAINE

11.2.1 Emplacement

Dans un premier temps, l'objectif doit être clairement défini. Si le projet concerne le déploiement d'une seule station en milieu urbain, il convient de décider si le but visé est de surveiller l'impact majeur sur le climat exercé par la ville ou un quartier type ou plus représentatif, ou alors de déterminer les caractéristiques d'un site particulier (éventuels problèmes d'ordre climatique ou nouveau projet d'urbanisme). Au départ, on peut évaluer les zones où la probabilité de rencontrer les effets les plus importants est la plus forte en se référant à la typologie des zones climatiques urbaines classées par ordre d'importance dans le tableau 11.1. De même, on peut évaluer le probable caractère typique d'une station donnée en s'appuyant sur éléments contenus dans le tableau 11.1 et en choisissant de vastes zones présentant le même type d'urbanisation en vue d'une analyse plus fine.

Dans le cadre des mesures de température et d'humidité de l'air, on peut utilement affiner la recherche en effectuant des relevés spatiaux à pied, à bicyclette ou en voiture à travers les zones à étudier. Cette opération doit être réitérée plusieurs fois avant de pouvoir établir des cartes en isolignes ou en coupe transversale (voir figure 11.3), indiquant l'emplacement des zones d'anomalies thermiques ou hydriques dignes d'intérêt. En général, le meilleur moment pour réaliser ce type de mesures se situe la nuit, quelques heures après le coucher ou avant le lever du soleil, par temps relativement calme et ciel clair, et ce pour

Tableau 11.1 Classification simplifiée de formes urbaines distinctes dans un ordre approximativement décroissant de leur capacité à influer sur le climat local (Oke, 2004, non publié)

Zone climatique urbaine ^a	Image	Indice de rugosité ^b	Rapport de forme ^c	% de construction (imperméable) ^d
1. Zone urbaine extrêmement développée avec des immeubles séparés, rapprochés et élevés portant un revêtement (ex : des tours en centre-ville)		8	> 2	> 90 %
2. Zone urbaine extrêmement développée et à haute densité de population avec des immeubles de 2 à 5 étages attenants ou très proches, souvent en brique ou en pierre (ex : d'anciens centres-villes)		7	1,0 - 2,5	> 85
3. Zone urbaine très développée et à densité moyenne de population avec des maisons, des magasins et des appartements attenants ou détachés mais rapprochés (ex : des logements urbains)		7	0,5 - 1,5	70 - 85
4. Zone urbaine très développée et à faible ou moyenne densité de population avec des immeubles larges et bas et des parkings goudronnés (ex : des centres commerciaux ou des entrepôts)		5	0,05 - 0,2	70 - 95
5. Zone périurbaine moyennement développée et à faible densité de population avec des maisons d'un ou deux étages (ex : maisons de banlieue)		6	0,2 - 0,6 peut être > 1 s'il y a des arbres	35 - 65
6. Zone à usage mixte avec de larges bâtiments situés dans un paysage dégagé (ex : hôpitaux, universités, aéroports)		5	0,1 - 0,5 dépend des arbres	< 40
7. Zone de développement semi-rural avec des maisons dispersées dans des espaces naturels ou agricoles (ex : fermes, domaines)		4	> 0,05 dépend des arbres	< 10

Bâtiments Végétation
 Sol imperméable ... Sol perméable

- a) Ensemble de classes simplifié reprenant certains éléments des systèmes d'Auer (1978) et d'Ellesfen (1990/91) ainsi que des mesures physiques liées au vent et à la régulation des températures et de l'humidité (colonnes de droite). La correspondance approximative entre les zones climatiques urbaines et les zones de terrain urbain d'Ellesfen est la suivante : 1 (Dc1, Dc8), 2 (A1-A4, Dc2), 3 (A5, Dc3-5, Do2), 4 (Do1, Do4, Do5), 5 (Do3), 6 (Do6), 7 (aucune).
- b) Rugosité effective des terrains selon la classification de Davenport (Davenport *et al.*, 2000) ; voir le tableau 11.2.
- c) Rapport de forme = Z_h/W . C'est la hauteur moyenne des principaux éléments de rugosité (bâtiments, arbres) divisée par leur espace-moyen ; en centre-ville il s'agit de la hauteur/largeur du couloir formé par une rue. Il existe un lien notable entre cette valeur et les types de régimes d'écoulement (Oke, 1987) ainsi que la régulation des températures (protection contre le soleil et filtrage des grandes longueurs d'onde) (Oke, 1981). Les grands arbres font augmenter cette valeur de manière notable.
- d) Proportion moyenne de terrain recouvert de constructions (bâtiments, routes, zones goudronnées et autres zones imperméables) ; le reste de la zone dispose d'une couverture perméable (espaces verts, eau et autres surfaces naturelles). La perméabilité a une incidence sur l'humidité du sol et donc sur l'humidification et sur le potentiel de refroidissement par évaporation.

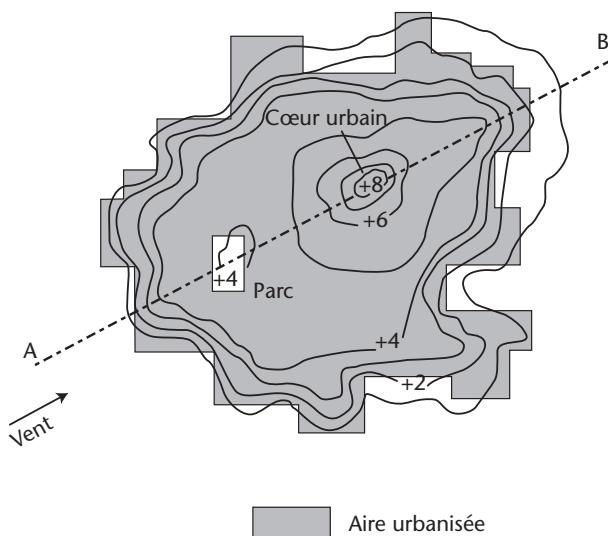


Figure 11.3. Configuration spatiale type des isothermes dans une grande ville la nuit par temps clair et calme. Ce graphique illustre l'effet des îlots de chaleur (d'après Oke, 1982).

augmenter les chances de bien distinguer les différences entre microclimat et climat local. Il n'est pas conseillé de conduire ce type d'observations au moment du lever ou du coucher du soleil car les variables météorologiques évoluent très rapidement à ces heures, rendant difficile toute comparaison spatiale significative.

Si la station doit s'intégrer à un réseau destiné à décrire les caractéristiques spatiales du climat urbain, il est alors nécessaire de disposer d'une vue plus large. Il convient donc de mener une réflexion sur la forme spatiale type des distributions climatiques en milieu urbain. Par exemple, les isolignes des îlots de chaleur et d'humidité ressemblent véritablement aux contours de leurs éponymes topographiques (figure 11.3). Elles présentent des « pentes » abruptes, avec souvent un « plateau » sur une grande partie de la zone urbaine, entrecoupées de « talus » et de « bassins » localisés de chaleur/fraîcheur et humidité/sécheresse. Ces paramètres correspondent aux parcelles plus ou moins urbanisées, tels que les zones résidentielles, les magasins, les usines ou les parcs, les espaces libres et les surfaces d'eau. En conséquence, il convient de prendre une décision : l'objectif est-il d'obtenir un échantillon représentatif de la diversité de la zone climatique urbaine ou de refléter fidèlement la structure spatiale ?

Dans la plupart des cas, la dernière proposition est trop ambitieuse pour un réseau de stations fixes implantées dans la couche de canopée urbaine. Il faudrait en effet un grand nombre de stations pour décrire les gradients à la périphérie, au niveau de la région en plateau, des crêtes et des creux des nœuds

de développement urbain plus faibles ou plus forts que la moyenne. Si les mesures sont réalisées à partir d'une tour, les détecteurs étant placés au-dessus de la sous-couche de rugosité, l'action de mélange produit des configurations spatiales plus voilées et la question de la longueur du fetch avant d'aborder la transition la plus proche avec une autre zone climatique urbaine, et l'interface zone urbaine/zone rurale, se pose avec pertinence. Alors qu'on peut admettre un fetch de 0,5 à 1 km à l'intérieur de la canopée urbaine, il sera sans doute plus proche de quelques kilomètres pour un détecteur monté sur une tour.

Dans la mesure où l'objectif est de surveiller le climat local induit par une zone urbaine, il convient d'éviter les influences microclimatiques externes ou autres phénomènes climatiques à échelle locale ou méso-échelle susceptibles de compliquer les observations. En conséquence, à moins de s'intéresser plus spécifiquement aux configurations climatiques liées à la topographie, il est judicieux d'éviter les endroits exposés aux effets à échelle locale ou méso-échelle tels que les effets du drainage de l'air froid en bas des vallées et le long des pentes dans la zone urbaine, de l'accélération du vent ou l'effet d'abri à proximité d'une colline ou d'un escarpement, les effets du brouillard dans les vallées fluviales ou aux abords des nappes d'eau, ou encore ceux des configurations nuageuses bloquées par la géographie des lieux, etc.. D'autre part, si de tels événements présentent un avantage ou un danger, il peut s'avérer utile de concevoir un réseau spécifiquement destiné à échantillonner ses effets sur le climat urbain, tels que les effets positifs d'une brise de mer ou de lac sur une ville trop chaude.

11.2.2 Implantation

Une fois choisis le type et l'emplacement de la zone climatique urbaine, l'étape suivante consiste à étudier la carte, les images satellites et les photographies pour réduire le nombre de sites possibles à l'intérieur de cette zone. On recherche les zones d'urbanisation relativement homogènes, sans anomalie de structure, de couvert ou de matériau sur de larges étendues. Il n'est toutefois pas possible de donner une définition précise du « relativement », dans la vie réelle, chaque quartier urbain présentant des spécificités qui lui sont propres et qui limitent son homogénéité à une certaine échelle. Néanmoins, s'il n'est pas possible de proposer une liste exhaustive, voici quelques exemples de ce qu'il faut éviter : des étendues inhabituellement humides dans une zone par ailleurs sèche, des bâtiments deux fois plus hauts que la hauteur moyenne du quartier, un grand parking asphalté au milieu de jardins irrigués, une importante source de chaleur concentrée telle qu'une installation de chauffage ou une cheminée de ven-

tilation d'un tunnel. Il convient également d'éviter toute proximité avec les zones de transition entre les différents types de zones climatiques urbaines, comme les sites sur lesquels sont ou risquent d'être prévus d'importants réaménagements urbains. Le degré de préoccupation en termes de paramètres anormaux diminue à mesure que l'on s'éloigne du site lui-même, comme nous l'avons vu par rapport aux zones sources.

Dans la pratique, pour chaque site envisagé, il convient d'estimer «une empreinte» en matière de rayonnement (voir par exemple l'équation 11.1) et de propriétés de turbulence. Ensuite, les principales propriétés de surface telles que la hauteur moyenne et la densité des obstacles, ainsi que les caractéristiques du couvert et des matériaux utilisés, devront être soigneusement analysées au sein de ces empreintes. Leur homogénéité devra ensuite être évaluée, soit visuellement, soit par la mise en œuvre de méthodes statistiques. Une fois sélectionnées les zones cibles relativement homogènes au niveau de l'abri ou d'une station implantée à une hauteur élevée (au-dessus de la sous-couche de rugosité), il conviendra de recenser les propriétaires de sites potentiellement favorables susceptibles de l'héberger. Si un organisme public recherche un site, il peut se tourner vers l'un des terrains par ailleurs utilisés dont il est déjà propriétaire dans la zone visée ou vers d'autres organismes ou entreprises (possédant bureaux, cours fermées, terrains libres, droits de passage) avec lesquels il entretient de bonnes relations, notamment les écoles, les universités, les entreprises de services collectifs (électricité, téléphone, canalisations) et les gestionnaires des voies de transport (routes, chemin de fer). Ces sites sont appropriés car ils sont faciles d'accès, sont souvent protégés contre le vandalisme et sont raccordés à l'électricité.

Les toits des bâtiments ont souvent constitué un site de prédilection pour les observations météorologiques. Ce choix était souvent fondé sur la conviction sans doute erronée qu'à cette hauteur, l'abri de l'instrument n'était pas exposé aux complications liées à la couche de canopée urbaine. En fait, il règne au sommet des toits un microclimat anormal très particulier qui risque de conduire à des résultats erronés. L'écoulement d'air au-dessus d'un bâtiment crée de fortes perturbations en termes de vitesse et de direction du vent et de rafales, lequel ne ressemble en rien à l'écoulement enregistré à la même altitude à une certaine distance du bâtiment ou près du sol (figure 11.5). Les bâtiments à toit plat peuvent en réalité créer des flux au niveau du toit contraires au flux principal externe et les vitesses varient d'une turbulence extrême à un quasi calme. Les toits sont en outre construits en matériaux aux propriétés thermiques plutôt extrêmes. Par vent léger et

ciel clair, ils peuvent devenir très chauds le jour et froids la nuit, d'où un fort gradient de température à proximité du toit. Ils sont aussi conçus pour être étanches et évacuer l'eau rapidement. Si on y ajoute leur exposition au rayonnement solaire et au vent, ils peuvent se révéler anormalement secs. Les toits constituent donc en général un piètre choix pour les observations de la température, de l'humidité et des précipitations, à moins de placer les instruments sur des mâts très hauts. Ils peuvent néanmoins s'avérer adaptés à l'observation des composantes du rayonnement incident.

Une fois le site choisi, il est primordial d'établir une description complète et détaillée des caractéristiques du site (métadonnées) (voir section 11.4).

11.3 EXPOSITION DES INSTRUMENTS

11.3.1 Modifications de la pratique normalisée

À bien des égards, les normes généralement admises en matière d'exposition des instruments météorologiques et décrites dans la partie I du présent Guide s'appliquent aux sites urbains. Toutefois, le respect de ces normes ne se justifie pas dans nombre de cas, quand il ne s'avère pas impossible. La présente section recommande un certain nombre de principes utiles dans ce cadre, même s'il est impossible d'envisager toutes les éventualités. Les recommandations présentées ci-après demeurent conformes aux objectifs généraux définis dans le chapitre I de la partie I.

De nombreuses stations urbaines ont été implantées au-dessus d'une herbe courte dans des lieux découverts (parcs, terrains de jeux), et mesurent donc en réalité des conditions de type rural modifié, non représentatives du milieu urbain. On arrive ainsi au constat étonnant que certaines stations urbaines couplées à des stations rurales n'enregistrent aucun effet urbain sur la température (Peterson, 2003).

Selon le principe directeur qui régit l'exposition des capteurs dans la canopée urbaine, il conviendra d'installer ces derniers de sorte à mesurer des conditions représentatives du milieu de la zone climatique urbaine étudiée. Dans les villes, il n'est pas judicieux d'adopter des sites où les conditions sont similaires à celles généralement rencontrées en rase campagne. Au contraire, il est recommandé d'implanter les stations urbaines au-dessus de surfaces représentatives d'un microclimat urbain à l'échelle locale. La catégorie % de bâti (tableau 11.1) n'est qu'une indication sommaire de la surface sous-jacente recommandée.

La distance aux obstacles, à savoir site suffisamment éloigné des arbres, des bâtiments, des murs ou autres obstacles (partie I, chapitre 1), constitue de toute évidence la condition la plus difficile à respecter dans de nombreux sites urbains. On recommande plutôt de déployer la station urbaine au centre d'un espace dégagé où le rapport de forme (z_H/W) est approximativement représentatif de la localité.

Lors de l'installation des instruments en milieu urbain, il est particulièrement important d'utiliser des câbles blindés en raison du grand nombre de lignes électriques et autres sources de bruit électrique présentes sur ces sites.

11.3.2 Température

11.3.2.1 Température de l'air

Les capteurs généralement utilisés pour mesurer la température de l'air (notamment leur exactitude et caractéristiques de réponse) sont adaptés aux mesures en milieu urbain. Il est recommandé d'accorder une attention toute particulière à leur protection contre le rayonnement et à leur ventilation. Dans la canopée urbaine, les capteurs sont susceptibles d'être placés relativement près de surfaces chaudes, telles qu'un mur éclairé par le soleil, une route ou un moteur chaud de véhicule, ou être exposés à la chaleur reflétée par des surfaces vitrées. En conséquence, les écrans utilisés devront arrêter efficacement le rayonnement. De même, il convient de prévoir une ventilation forcée des capteurs placés dans la partie basse de la canopée urbaine si ces derniers sont dotés d'une protection très efficace. Si un réseau comporte à la fois des groupes de capteurs avec ou sans protection ou ventilation, cela peut expliquer les différences enregistrées d'un site à l'autre. Les pratiques mises en œuvre doivent donc être uniformisées.

La surface au-dessus de laquelle on mesure la température de l'air et l'exposition du groupe de capteurs doivent suivre les recommandations données dans la section précédente, à savoir que la surface doit être représentative de la zone climatique urbaine et l'abri ou l'écran de protection du thermomètre doit être placé au centre d'un espace présentant un rapport de forme (z_H/W) moyen. Dans les zones climatiques urbaines à forte densité de bâti, cela peut impliquer de placer les capteurs à une distance située entre 5 et 10 m seulement de bâtiments hauts de 20 à 30 m.

Si le site est une rue canyon, z_H/W s'applique uniquement à la coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la rue. Il peut également être utile de prendre en compte l'orientation de la rue en raison des configurations systématiques soleil/ombre. Si l'on planifie une surveillance continue, il convient de choisir

les rues orientées nord-sud plutôt qu'est-ouest car la distorsion de phase est moins importante, même si on peut observer des pics de température au cours de la journée.

Dans les stations situées en dehors des zones urbaines, la hauteur recommandée de l'écran se situe entre 1,25 et 2 m au-dessus du sol. Si on peut admettre ces valeurs en milieu urbain, il peut s'avérer judicieux d'assouplir cette règle et envisager des hauteurs plus élevées, sans risque d'erreur importante dans la plupart des cas. Ceci est particulièrement vrai dans les zones à forte densité de bâti car les observations dans les canyons font apparaître des gradients de température très faibles dans la plus grande partie de la couche de canopée urbaine, à condition de se situer à plus d'un mètre d'une surface (Nakamura et Oke, 1988). Les mesures réalisées à trois ou cinq mètres ne diffèrent sensiblement pas de celles réalisées à la hauteur standard, elles permettent de couvrir des zones sources relativement plus importantes, de mettre les capteurs hors d'atteinte afin d'éviter tout risque de dommage, et de les éloigner des voies de circulation. Elles permettent en outre une meilleure dilution de la chaleur émise par les gaz d'échappement automobiles et une réduction de la contamination provoquée par les poussières.

Les températures mesurées au-dessus de la canopée urbaine à l'aide de capteurs montés sur une tour subissent l'influence des flux échangés avec la canopée, auxquels s'ajoutent les effets des toits. Les toits présentent une variabilité thermique infiniment plus importante que la plupart des autres surfaces à l'intérieur de la canopée. La plupart des toits sont conçus pour isoler et donc réduire au minimum les échanges de chaleur avec l'intérieur des bâtiments. En conséquence, la température de surface des toits peut devenir très élevée le jour, alors que les murs des bâtiments et le sol des rues canyons, partiellement à l'ombre et plus conducteurs, sont plus frais. La nuit, les conditions s'inversent, les toits étant relativement froids et les surfaces à l'intérieur des rues canyons plus chaudes à mesure qu'elles restituent la chaleur absorbée pendant la journée. On peut également enregistrer des complications liées aux rejets thermiques au niveau des toits. En conséquence, alors que la température varie peu avec la hauteur dans la canopée urbaine, on relève une discontinuité au niveau des toits tant horizontale que verticale. Il convient d'installer les détecteurs bien au-dessus des toits, $> 1,5 z_H$ si possible, pour obtenir une moyenne spatiale significative, et favoriser ainsi le mélange de l'air entre le toit et le canyon. À partir des données de température relevées par un capteur placé en altitude, il est difficile d'extraire les valeurs enregistrées au niveau de l'écran car il n'existe pas pour l'instant de méthode standard. De même, il n'existe pas de mécanisme général simple

pour extrapoler les températures horizontalement à l'intérieur de la canopée urbaine. Les modèles statistiques donnent de bons résultats, mais il faut pouvoir disposer d'un très grand nombre d'archives de données observées par un réseau dense de capteurs, ce qui n'est généralement pas le cas.

11.3.2.2 Température de surface

Il n'est pas fréquent de mesurer la température de surface dans les stations urbaines, mais ce paramètre pourrait représenter une variable très utile pour alimenter les modèles destinés à calculer les flux. Pour obtenir une valeur représentative de la température de surface, il convient de faire la moyenne des échantillons des nombreuses surfaces, tant horizontales que verticales, qui constituent une zone urbaine. Ceci ne peut être réalisé que par télédétection infrarouge à l'aide d'un scanner embarqué sur un aéronef ou un satellite, d'un pyrgomètre pointé vers le bas, d'un ou plusieurs thermomètres à rayonnement dont le champ cumulé de vision couvre un échantillon représentatif d'un quartier. En conséquence, il convient de correctement échantillonner la cible et bien définir son émissivité si l'on veut obtenir des résultats précis.

11.3.2.3 Température du sol et de la route

Il est conseillé de mesurer la température du sol dans les zones urbaines. L'effet d'îlot de chaleur s'étend au sous-sol, ce qui peut avoir une incidence sur la conception technique des canalisations d'eau ou la construction des routes. En pratique, il peut s'avérer difficile de mesurer cette variable dans les sites fortement urbanisés. Le sol nu est souvent rare, le profil du sol est souvent fortement perturbé et on peut trouver en profondeur des obstacles ou des objets anormalement chauds ou froids (par exemple des canalisations d'eau vides, pleines ou qui fuient, des égouts ou des conduites de chauffage). La mesure de la température minimale sur gazon ne présente pratiquement aucun intérêt en milieu urbain.

Les capteurs de température sont souvent enfouis dans la chaussée, en particulier dans les régions exposées au gel. Ils sont généralement reliés à une station de surveillance de la météorologie des routes. Il peut être très utile de placer les capteurs au niveau de la zone de contact avec les pneumatiques et au centre de la voie.

11.3.3 Pression atmosphérique

À l'échelle urbaine, il sera probablement inutile de mesurer la pression atmosphérique s'il existe déjà une station synoptique dans la région. Néanmoins, si des capteurs de pression sont prévus, les recommandations du chapitre 3 de la partie I, s'appliquent. À l'intérieur des bâtiments ou à proximité de

ces derniers, on risque d'observer un phénomène de « pompage » dû aux rafales de vent. On peut en outre relever des différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments si le capteur est installé dans une pièce climatisée. Il suffit pour remédier à ces deux difficultés d'installer une sonde de pression statique (voir partie I, chapitre 3, section 3.8).

11.3.4 Humidité

Les instruments généralement destinés à mesurer l'humidité (partie I, chapitre 4) peuvent être utilisés en milieu urbain. Les consignes données dans la section 11.3.2.1 relatives à l'implantation et l'exposition de capteurs de température dans la canopée urbaine et au-dessus de la sous-couche de rugosité s'appliquent également aux capteurs d'humidité.

Il est bien connu que le milieu urbain est contaminé (poussières, huiles, polluants). Dans ce contexte, certains hygromètres se détériorent et doivent faire l'objet d'un entretien plus fréquent. C'est pourquoi si des méthodes psychrométriques sont mises en œuvre, il convient de remplacer plus souvent le manchon des thermomètres mouillés et de veiller à ce que l'eau distillée ne soit pas contaminée. Les cheveux d'un hygromètre à cheveu peuvent être détruits par l'air pollué de la ville, c'est pourquoi il est déconseillé de faire appel à ce type d'instrument sur des périodes prolongées. Le miroir des hygromètres à condensation et les fenêtres des hygromètres à infrarouge et ultraviolet doivent être nettoyés régulièrement. L'état de certains instruments se dégrade tellement qu'il faut remplacer entièrement les capteurs à intervalles relativement fréquents. Les instruments installés dans la canopée urbaine étant protégés du vent par un abri, il est essentiel de prévoir une ventilation forcée telle que recommandée dans la partie I, chapitre 4, section 4.2, ainsi qu'une protection contre les sources externes de rayonnement solaire et de rayonnement de grandes longueurs d'onde.

11.3.5 Vitesse et direction du vent

Les mesures de la vitesse et de la direction du vent sont très sensibles à la distorsion de l'écoulement en présence d'obstacles, lesquels modifient la turbulence et l'écoulement moyens du vent à toutes les échelles étudiées. Leurs effets sont notamment observés au niveau du relief local en raison de la présence de collines, de vallées et de falaises, de changements brusques de rugosité ou d'altitude (z_d , voir ci-dessous), d'une perturbation de l'écoulement autour de bouquets d'arbres ou d'ensembles de bâtiments, d'un arbre ou d'un bâtiment, et d'une perturbation uniforme induite par la masse physique de la tour ou du bras de montage sur lequel sont fixés les instruments.

11.3.5.1 Profil moyen du vent

Toutefois, si un site se trouve sur un terrain relativement horizontal, avec un fetch suffisant en aval des principaux changements de rugosité, et est constitué d'une seule zone climatique urbaine sans bâtiments anormalement élevés, on doit pouvoir observer un profil de vent moyen tel qu'illustré dans la figure 11.4. La moyenne est à la fois spatiale et temporelle. Il n'existe vraisemblablement aucun site présentant un tel profil dans la canopée urbaine. Les différents lieux d'implantation sont exposés à des changements de direction et de vitesse du vent extrêmement variables à l'interface des bâtiments, des rues, des cours et des arbres. La forme du profil diffère selon qu'il s'agit d'un écoulement longitudinal ou d'un écoulement transversal dans le canyon (Christen et al., 2002) et dépend de sa position par rapport à la rue, transversale ou longitudinale (De-Paul et Shieh, 1986). Les gradients de vitesse du vent dans la canopée urbaine sont faibles pratiquement jusqu'à la surface. En première approximation, on peut décrire le profil à l'intérieur de la canopée sous une forme exponentielle (Britter et Hanna, 2003) qui se confond avec le profil logarithmique près des toits (figure 11.4).

Dans la sous-couche en équilibre, la théorie de la similitude de Monin-Obukhov s'applique, notamment la loi logarithmique suivante :

$$\bar{u}_z = (u_* / k) \{ \ln[(z - z_d) / z_0] + \Psi_M \left(\frac{z}{L} \right) \} \quad (11.2)$$

dans laquelle u_* est la vitesse de frottement; k la constante de von Karman (0,40) ; z_0 la longueur de rugosité d'un élément de surface; z_d la hauteur de déplacement (figure 11.4) ; L la longueur de stabilité d'Obukhov ($= -u_*^3/[k(g/\theta_v)Q_H]$), où g est l'accélération de la pesanteur, θ_v la température potentielle virtuelle de l'air et Q_H le flux turbulent de chaleur sensible); et Ψ_M une fonction sans dimension qui tient compte du changement de courbure du profil de vent qui s'éloigne du profil neutre avec une plus grande stabilité ou instabilité¹. En cas de profil neutre (généralement par vent fort et ciel nuageux), Ψ_M est égal à 1, l'équation 11.2 se réduit à :

$$\bar{u}_z = (u_* / k) \ln[(z - z_d) / z_0] \quad (11.3)$$

On peut mesurer les paramètres de profils de vent à l'aide d'anémomètres assemblés verticalement, ou en mesurant les flux de quantité de mouvement ou l'intensité des rafales à l'aide d'anémomètres à réponse rapide dans la couche en équilibre. Toutefois, les estimations varient avec la direction du vent et sont sensibles aux erreurs (Wieringa, 1996 ; Verkaik, 2000). Il existe également des méthodes pour calculer les paramètres de profil de vent z_0 et

¹ Pour plus de détails sur L et la forme de la fonction Ψ_M , consultez un texte de référence dans le domaine de la micrométéorologie, par exemple, Stull, 1988 ; Garratt, 1992 ; ou Arya, 2001. Notez qu'il convient d'évaluer u_* et Q_H dans la couche en équilibre au-dessus de la sous-couche de rugosité.

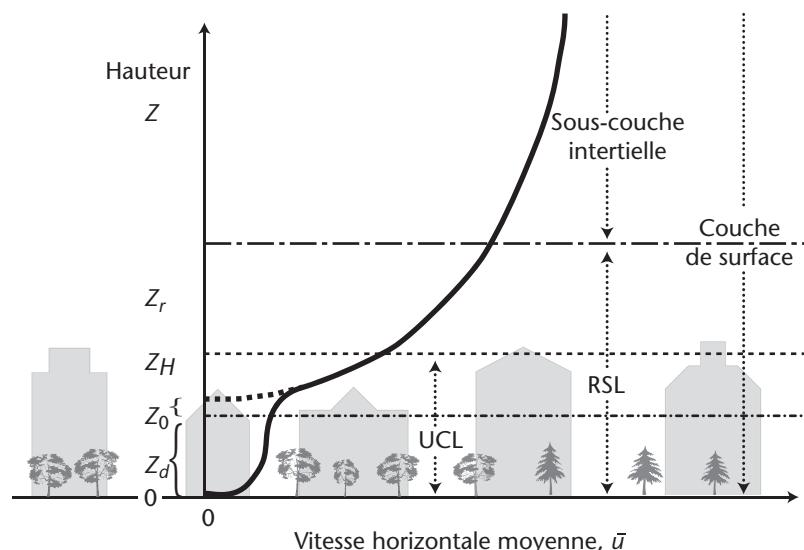


Figure 11.4. Moyenne généralisée (spatiale et temporelle) du profil de la vitesse du vent (u) dans une zone urbaine dense. Le graphique indique également l'emplacement des sous-couches de la couche superficielle. Les valeurs indiquées sur l'axe des ordonnées (hauteur) correspondent à la hauteur moyenne des éléments de rugosité (Z_r), à la sous-couche de rugosité (Z_d ou hauteur de combinaison), à la longueur de rugosité (Z_0) et à la longueur de déplacement sur le plan zéro (Z_d). La ligne en pointillés représente le profil extrapolé à partir de la sous-couche inertentielle ; la ligne continue représente le profil réel.

Tableau 11.2. Classification de Davenport sur la rugosité effective des terrains^a

Catégorie	Z_0 (m)	Description de la zone
4 Relativement dégagée	0,10	Zone modérément dégagée avec quelques obstacles occasionnels (ex : des bâtiments bas ou des arbres isolés) et des espacements horizontaux relatifs d'au moins vingt fois la hauteur des obstacles
5 Rugueuse	0,25	Obstacles dispersés (bâtiments) à des distances relatives de huit à douze fois la hauteur des obstacles pour des objets solides et bas (ex : des bâtiments) (l'analyse peut nécessiter Z_d) ^b
6 Très rugueuse	0,5	Zone modérément recouverte de bâtiments bas avec des espacements relatifs de trois à sept fois la hauteur des obstacles et aucun grand arbre (l'analyse nécessite Z_d) ^b
7 Filtrante	1,0	Zone à haute densité de bâtiments sans variation importante de la hauteur des bâtiments (l'analyse nécessite Z_d) ^b
8 Chaotique	2,0	Centres-villes comportant une combinaison de bâtiments bas et élevés (analyse en soufflerie conseillée)

a) Version abrégée (révisée en 2000, uniquement pour la rugosité urbaine) de Davenport *et al.* (2000) ; pour les catégories 1 à 3 et pour les catégories rurales 4 à 8, voir Partie I, chapitre 5, ainsi que l'annexe au présent Guide et OMM (2003a).

b) Les valeurs de Z_d du premier ordre sont fournies en pourcentage de la hauteur moyenne des obstacles, par ex : 0,5 Z_H , 0,6 Z_H et 0,7 Z_H respectivement pour les catégories de Davenport 5, 6 et 7.

z_d en milieu urbain (voir les analyses dans Grimmond et Oke, 1999 ; Britter et Hanna, 2003). Les méthodes les plus simples consistent en une description générale des modes d'occupation des sols et des obstacles (voir tableaux 11.1 et 11.2 ; ainsi que Davenport *et al.*, 2000 ; Grimmond et Oke, 1999), ou une description détaillée des hauteurs des différents éléments de rugosité et leur espace-ment, laquelle s'appuie soit sur un système d'information géographique indiquant les dimensions des bâtiments et des rues, soit sur des cartes et des photographies aériennes obliques, des images aé-riennes ou satellites, auxquelles on applique l'une des nombreuses formules empiriques qui existent (voir les recommandations dans Grimmond et Oke, 1999).

Il est important d'intégrer la hauteur de déplacement z_d dans les évaluations de profils du vent. Cela équivaut effectivement à définir une base de profil logarithmique du vent qui prend en compte la masse physique de la canopée urbaine. Cela revient à définir une nouvelle «surface de sol» en altitude, là où se situe le puits de quantité de mouvement moyennée de l'écoulement (figure 11.4).

Selon la densité du bâti et des arbres, il est possi-ble de définir la base du profil à une hauteur se si-tuant entre 0,5 et 0,8 z_H (Grimmond et Oke, 1999). En conséquence, ne pas intégrer ce paramètre dans les calculs peut engendrer un risque important d'erreurs. On peut réaliser les premières estimations en utilisant les fractions de z_H données dans le tableau 11.2 (note b).

11.3.5.2 Hauteur de la mesure et exposition

Le choix de la hauteur à laquelle réaliser les mesures de vent en ville est une question difficile. Toutefois, on peut obtenir des résultats satisfaisants si l'on res-pece certains principes fondamentaux. Un mauvais positionnement des capteurs de vent en ville peut entraîner un gaspillage considérable de ressources et d'efforts, et un risque d'erreurs dans le calcul de la dispersion des polluants. Ceci est déjà une source de difficulté en terrain dégagé en raison des effets liés aux obstacles et à la topographie. C'est pourquoi la hauteur standard pour les observations du vent en milie rural a été fixée à 10 m au-dessus du sol et non pas au niveau de l'abri, et la distance horizon-tale entre un anémomètre et un obstacle doit être égale à au moins dix fois la hauteur de cet obstacle (partie I, chapitre 5, section 5.9.2). Dans les quartiers urbains types, il est impossible de trouver un site correspondant à ces critères. Dans une zone clima-tique urbaine par exemple, avec des immeubles de 10 m de haut et des arbres, il faudrait pouvoir dispo-ser d'une parcelle d'un rayon de 100 m au minimum. Et même si c'était le cas, ce site ne serait certaine-ment pas représentatif de la zone. Nous avons déjà noté que la sous-couche de rugosité, dans laquelle les effets de différents éléments de rugosité persis-tent, s'étend à une hauteur approximativement éga-le à 1,5 z_H dans une zone à forte densité de bâti, et probablement plus dans les sites moins urbanisés. En conséquence, dans le quartier étudié, la hauteur minimale admise pour l'implantation d'un anémo-mètre se situe au minimum à 15 m, et non pas à 10 m comme prescrit. Là où les immeubles sont

encore plus hauts, un anémomètre placé à la hauteur standard de 10 m pourrait se retrouver très en-dessous de la canopée urbaine en raison de l'hétérogénéité de la forme urbaine et donc de la structure du vent. Placer un capteur en-dessous ou voire au même niveau que les toits ne présenterait pas de véritable intérêt.

D'après les observations réalisées en soufflerie ou sur le terrain, on sait bien que l'écoulement au-dessus d'un obstacle isolé fixe, un immeuble par exemple, est fortement perturbé aux abords immédiats de ce dernier : modifications des lignes de flux, apparition de zones de recirculation sur le toit et dans ce qu'il est convenu d'appeler la «bulle» ou cavité à l'arrière du bâtiment, effets de sillage qui persistent dans l'écoulement aval équivalents à plusieurs dizaines de fois la hauteur des bâtiments et atteignent une grande partie du voisinage (figure 11.5).

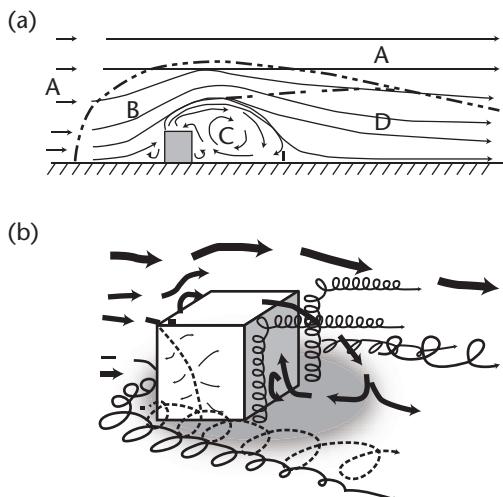


Figure 11.5. Flux bidimensionnel type autour d'un bâtiment avec le flux courant orienté vers la face au vent : a) lignes de courant et zones de flux ; A représente le courant non perturbé, B le déplacement, C la cavité, D le sillage (d'après Halitsky, 1963) ; b) flux et structures du tourbillon (simplifiés d'après Hunt et al., 1978).

Les exemples d'exposition défaillante d'anémomètres associés à des girouettes en ville sont légion. Les données enregistrées par ce type d'instruments sont fausses, de nature à induire en erreur et potentiellement dangereuses si on les utilise pour calculer la dispersion ou la charge due au vent, et constituent donc un gaspillage des ressources. On ne saurait donc trop insister sur le caractère inapproprié d'une installation d'anémomètres et de girouettes sur des mâts courts au sommet des bâtiments. La vitesse et la direction des vents varient énormément à courte distance, tant dans le plan vertical qu'horizontal. Les résultats enregistrés par des instruments ainsi déployés ne reflètent absolument pas l'écoulement

général et sont fonction des caractéristiques spécifiques du bâtiment lui-même, de l'implantation du mât sur la structure, et de l'incidence de l'écoulement par rapport au bâtiment. L'écoulement laminaire et l'écoulement tourbillonnaire illustrés sur la figure 11.5 signifient que, si l'on place le mât à l'avant, au sommet ou dans la zone de cavité à l'arrière d'un bâtiment, les mesures de direction pourraient bien contredire celles qui prévalent dans l'écoulement relevé en-dehors de la zone d'influence du climat qui règne autour de l'immeuble (à savoir dans la zone A de la figure 11.5a), avec des vitesses qui varient fortement. Si l'on veut s'éloigner de la zone perturbée, il convient d'installer ce type d'instruments à très grande hauteur. Par exemple, Wieringa (1996) a proposé de placer ces capteurs à une hauteur supérieure à la dimension horizontale maximale du toit principal. Ceci implique d'installer un système onéreux de mâts, probablement dotés de haubans destinés à sous-tendre une aire importante et sans doute des difficultés à obtenir les autorisations nécessaires. Néanmoins, c'est la seule méthode acceptable si l'on veut obtenir des données satisfaisantes.

Pour faire face à ces réalités, il conviendra de monter les capteurs de manière à ce que la structure porteuse de ces derniers ne vienne pas trop compromettre la validité du signal émis. En conséquence, les recommandations suivantes s'appliquent :

- a) Dans les zones urbaines caractérisées par une faible concentration d'éléments de faible hauteur (zones climatiques urbaines 6 et 7), on peut, dans certains cas, choisir un site qui respecte les directives normalisées en matière d'exposition en rase campagne. Pour pouvoir appliquer la consigne des 10 m en hauteur, les obstacles les plus proches doivent se situer à une distance de l'anémomètre équivalente à au moins dix fois leur hauteur et ne doivent pas dépasser 6 m de hauteur en moyenne ;
- b) Dans les quartiers caractérisés par une plus forte concentration de bâtiments, une densité et une hauteur homogènes des différents éléments (bâtiments et arbres), les mesures de vitesse et de direction du vent doivent être réalisées à l'aide d'un anémomètre monté sur un mât en treillis à une hauteur minimale égale à 1,5 fois la hauteur moyenne de ces éléments ;
- c) Dans les zones urbaines caractérisées par une dispersion des bâtiments élevés, les recommandations au point b) s'appliquent, à condition de bien veiller à éviter la zone de sillage créé par les structures élevées ;
- d) Il n'est pas recommandé de mesurer la vitesse et la direction du vent dans les zones à forte densité de bâti comportant de nombreuses structures de grande hauteur, à moins d'utiliser une tour très haute.

Les anémomètres installés sur une tour en treillis doivent être montés sur des bras (consoles) suffisamment longs pour maintenir les capteurs à une distance du mât égale à au moins deux (de préférence trois) fois le diamètre de la tour (Gill *et al.*, 1967). Les capteurs doivent être montés dans le sens d'écoulement le moins fréquent à travers la tour. Si cela n'est pas possible, ou si le treillis de la tour est trop serré, il faudra peut-être prévoir deux ou trois bras portant des capteurs destinés à doubler les précédents pour éviter les effets de sillage et la stagnation au vent produite par la tour elle-même.

Si vous devez installer des mâts d'anémomètres sur des bâtiments élevés ou isolés, vous devrez prendre en compte l'incidence des dimensions de cette structure sur l'écoulement (voir part II, chapitre 5, section 5.3.3). Il faudra probablement procéder à une analyse réalisée sur des modèles en soufflerie, en canal jaugeur ou des modèles de calcul de dynamique des fluides spécifiquement conçus pour le bâtiment étudié, prenant en compte le terrain et les structures environnantes.

L'objectif est de s'assurer que toutes les mesures de vent sont réalisées à des altitudes représentatives de la rugosité de surface en amont à l'échelle locale et qu'elles sont le moins sensibles possible aux influences combinées des anomalies de surface à micro-échelle ou échelle locale. C'est pourquoi il convient de mettre l'accent sur l'obtention de mesures précises à n'importe quelle hauteur en vue de réduire le risque d'erreur plutôt que d'effectuer des mesures à la hauteur standard. Il faudra peut-être dédoubler le site et séparer les anémomètres des autres systèmes de mesure. Il faudra peut-être également procéder à des observations du vent à différentes altitudes dans une même localité. Cela nécessitera une extrapolation des valeurs mesurées pour obtenir une valeur commune si on recherche des différences spatiales ou si les données sont destinées à alimenter un modèle mésoéchelle. On peut facilement réaliser ce type d'extrapolation en appliquant le profil logarithmique (équation 11.2) à deux hauteurs :

$$\bar{u}_1 / \bar{u}_{ref} = \ln(z_1 / z_0) / \ln(z_{ref} / z_0) \quad (11.4)$$

Où z_{ref} est la hauteur de référence choisie ; z_1 la hauteur à laquelle l'anémomètre est installé sur le site; et z_0 la longueur de rugosité de la zone climatique urbaine. En milieu urbain, il convient de définir la hauteur de référence de manière à inclure la hauteur de déplacement dans le plan-origine, notamment z_1 et z_{ref} prennent la forme $(z_x - z_d)$, où l'indice x correspond à «1» ou «ref». On suggère une hauteur de référence de 50 m au-dessus de la hauteur de déplacement.

Les autres corrections liées aux perturbations dues à l'écoulement, à la topographie et aux effets de rugosité compte tenu de l'exposition, pourront être apportées en se référant aux recommandations du chapitre 5 de la partie I (voir section 5.9.4, Correction compte tenu de l'exposition). Il se pourrait que les observations du vent s'avèrent impossibles pour un site urbain donné. Dans ce cas, il est toujours envisageable de calculer le vent à la hauteur de référence à partir des résultats d'observations réalisées dans une autre station urbaine ou à l'aéroport en utilisant le modèle de transformation logarithmique de Wieringa (1986) :

$$\bar{u}_{zA} = \bar{u}_{zB} \left[\frac{\ln(z_r / z_{0B}) \cdot \ln(z_A / z_{0A})}{\ln(z_B / z_{0B}) \cdot \ln(z_r / z_{0A})} \right] \quad (11.5)$$

Où les indices A et B désignent respectivement le site étudié pour lequel on cherche à mesurer les vents et le site pour lequel on dispose de mesures standards du vent. La hauteur de mélange z_r devra soit être égale à 4 z_H (section 11.1.1.3), soit se voir attribuer la valeur standard de 60 m, la méthode n'étant pas très sensible à ce terme. Dans ce cas également, si l'un des deux sites comporte des éléments de rugosité élevés et denses, l'échelle correspondante de hauteur devra prendre en compte z_d .

11.3.5.3 Étude des capteurs de vent

On peut utiliser dans les zones urbaines les instruments destinés à mesurer la vitesse et la direction du vent, les rafales et autres caractéristiques de l'écoulement dans des milieux non urbains. En ville, il convient de toujours mesurer la direction du vent, ainsi que sa vitesse, pour pouvoir corriger l'influence de la tour selon l'azimut. Les anémomètres à coupelles devront être fréquemment nettoyés en raison de la pollution atmosphérique, et l'état des paliers et les traces de corrosion devront faire l'objet d'une attention toute particulière. Si les mesures sont réalisées dans la canopée urbaine, les rafales peuvent accentuer le problème de survitesse des coupelles, et si les anémomètres sont trop protégés, ils risquent de fonctionner en-dessous ou au seuil de vitesse minimum. On peut résoudre cette question en renforçant leur maintenance et en faisant appel à des anémomètres à réponse rapide, à hélice ou acoustiques. Les anémomètres à hélice sont moins exposés au risque de survitesse et les anémomètres acoustiques ne requièrent pratiquement aucune maintenance n'étant dotés d'aucune pièce mobile. Toutefois, ils sont d'un coût élevé et nécessitent un système d'enregistrement et de traitement électronique perfectionné. En outre, certains modèles ne fonctionnent pas par temps pluvieux.

11.3.6 Précipitations

Les instruments et méthodes de mesure des précipitations présentés dans la partie I, chapitre 6, sont également adaptés au milieu urbain. La mesure des précipitations, telles que la pluie ou la neige, peut toujours être entachée d'erreurs liées à l'exposition de l'instrument, en particulier au champ de vent à proximité. Étant donné le contexte urbain et les fortes variations du champ de vent dans la canopée urbaine et la sous-couche de rugosité, on est confronté à quatre grandes sources d'erreur :

- a) L'interception de la précipitation dans sa trajectoire pour atteindre le sol par des surfaces réceptrices proches telles que des arbres et des bâtiments ;
- b) Les surfaces dures à proximité de l'instrument susceptibles de provoquer un rejaillissement de l'eau vers l'appareil de mesure et les objets en surplomb qui peuvent s'égoutter dans l'appareil ;
- c) La complexité spatiale du champ de vent autour des obstacles dans la canopée urbaine peut entraîner une concentration très localisée ou l'absence d'écoulement d'air génératrice de pluie ou de neige ;
- d) Les rafales de vent associées à la présence physique de l'instrument provoquent une turbulence anormale autour de ce dernier, ce qui conduit à des erreurs de captation et une sur ou sous-estimation des quantités précipitées.

Pour une exposition standard en rase campagne, la distance aux obstacles doit être égale à au moins deux fois leur hauteur. Cette consigne est donc dans une certaine mesure moins restrictive que pour les mesures de température, d'humidité ou de vent. Toutefois, l'activité turbulente créée par le flux autour de bâtiments à arêtes vives dans la canopée urbaine est plus intense qu'autour des obstacles naturels et se prolonge sur de plus grandes distances dans leur sillage. Soulignons encore une fois qu'en raison des vitesses et directions du vent extrêmement variables observées sur le toit d'un bâtiment, il est conseillé d'éviter ce type de sites.

En revanche, contrairement aux mesures de température, d'humidité ou de vent, les mesures de précipitations visent rarement à analyser des effets locaux, à l'exception sans doute de l'intensité pluviale. Certains effets urbains sur les précipitations peuvent être déclenchés à l'échelle locale (par exemple par une installation industrielle importante), mais peuvent se manifester bien en aval de la ville sous le vent. Les différentes configurations observées au sein d'une même zone urbaine s'expliquent sans doute plus par des effets liés à la topographie (relief, zone côtière, etc.).

Selectionner un vaste site dégagé en ville, respectant les normes d'exposition, peut éventuellement constituer une solution acceptable, mais dans ce cas, l'instrument ne pourra pas être installé au même endroit que les capteurs de température, d'humidité et de vent. En effet, le positionnement de ces derniers doit être représentatif de la structure urbaine à l'échelle locale, du tissu et du métabolisme d'une zone climatique urbaine donnée, alors que ce n'est pas le cas pour la mesure des précipitations.

Toutefois, l'environnement local de l'instrument joue un rôle important lorsqu'on utilise la station pour étudier les configurations intra-urbaines du type de précipitation. Par exemple, l'îlot de chaleur urbain a une incidence sur la survie des différentes formes de précipitations; par exemple, la neige ou du grésil à la base des nuages peut fondre au contact de l'air plus chaud de la ville et atteindre le sol sous forme de pluie. On peut donc enregistrer de la neige dans les zones rurales et suburbaines et de la pluie au centre ville.

Les pluviomètres installés en milieu urbain devront respecter les recommandations suivantes :

- a) Les instruments devront être déployés sur des sites urbains dégagés respectant les critères standards d'exposition (par exemple des terrains de sports, des parcs caractérisés par une faible densité d'arbres, des aéroports urbains) ;
- b) Les instruments devront être associés à des anémomètres chaque fois qu'il sera possible de trouver un site représentatif. Dans les sites autres que ceux à faible densité de bâti, cela impliquera sans doute de monter l'instrument sur un mât au-dessus d'un toit. Le pluviomètre sera donc exposé à des vitesses de vent supérieures à la normale et l'erreur d'estimation sera donc plus importante que près de la surface. Il conviendra alors de corriger les données fournies par l'instrument. Cette correction n'est possible que si le vent est mesuré sur le même mât. Cela signifie en outre qu'il convient de privilégier l'enregistrement automatique et de vérifier régulièrement l'état de l'instrument pour s'assurer qu'il est bien de niveau et que l'orifice est exempt de tous débris ;
- c) Les instruments ne devront pas être installés sur les toits des bâtiments, sauf s'ils sont exposés à une hauteur suffisante pour éviter l'effet de protection du bâtiment au vent ;
- d) L'épaisseur de la neige devra être mesurée en terrain découvert, ou dans les sites urbanisés, il conviendra de rechercher une zone échantillon suffisamment vaste pour pouvoir tenir compte de l'inévitable accumulation de neige autour des obstacles. Cette zone devra être représentative des rues orientées dans différentes directions.

Les hydrologues urbains s'intéressent à l'intensité des précipitations, en particulier au cours de violentes tempêtes. En conséquence, les pluviomètres enregistreurs à augets basculeurs ou à pesée peuvent s'avérer utiles. La mesure des chutes de pluie et de neige dans les zones urbaines profiterait certainement du développement de techniques telles que les pluviomètres optiques et les radars.

La rosée, la glace et les précipitations de brouillard s'observent également en ville et peuvent jouer un rôle important dans le bilan hydrique, en particulier pour certaines surfaces. Ces paramètres peuvent être pris en compte dans certaines applications, par exemple dans les études relatives aux maladies des plantes, à l'activité des insectes, la sécurité routière ou la recherche de ressources supplémentaires en eau. Les méthodes présentées dans la partie I, chapitre 6 peuvent s'appliquer aux sites urbains.

11.3.7 Rayonnement

On enregistre actuellement une pénurie de mesures des flux radiatifs en milieu urbain. Par exemple, la Banque de données du bilan énergétique de la Terre du Programme climatologique mondial et de l'Atmospheric Radiation Measurement Program (Programme de mesure du rayonnement atmosphérique) du Département de l'énergie des États-Unis n'en font pratiquement pas état. Les sites de mesure du rayonnement sont souvent situés dans des zones rurales ou reculées précisément pour éviter que les aérosols et les gaz polluants émis en ville ne viennent fausser les enregistrements. Même lorsqu'une station porte le nom d'une ville, les métadonnées révèlent qu'en réalité, ces dernières dépassent généralement largement les limites de l'agglomération. Si les stations sont déployées dans une zone bâtie, seul le rayonnement solaire global incident peut être mesuré. En effet, il est impossible de mesurer le rayonnement incident de grandes longueurs d'onde ou les flux sans composante sortante. La grande majorité des projets expérimentaux à court terme qui s'intéressent aux effets urbains mesurent à la fois la réception et la perte du rayonnement dans les villes. Tous les flux de courtes et de grandes longueurs d'onde sont affectés par les propriétés particulières de l'atmosphère et des surfaces urbanisées, et c'est également vrai pour le bilan radiatif net toutes ondes dont dépend en réalité le bilan énergétique urbain (Oke, 1988a).

Tous les instruments, les étalonnages et les corrections à appliquer, et la plupart des méthodes mis en œuvre dans les mesures de rayonnement en rase campagne et présentés dans la partie I, chapitre 7, peuvent être utilisés dans les zones urbaines. Nous

ne mentionneront ci-après que les différences ou les besoins ou difficultés spécifiques au milieu urbain.

11.3.7.1 Flux incidents

Le rayonnement solaire incident est une variable essentielle du forçage climatique urbain et c'est pourquoi il doit faire l'objet d'une priorité élevée lors de la création ou de la modernisation d'une station. Une bonne connaissance de ce paramètre, associée aux observations standards de la température, de l'humidité et de la vitesse du vent et à des mesures simples de la structure du site et du couvert, permet de mettre en œuvre un plan de prétraitement météorologique (à savoir des méthodes et des algorithmes visant à convertir des champs d'observation standards en variables destinées à alimenter des modèles, mais sans réaliser de mesures, portant par exemple sur les flux, la stabilité, la hauteur de mélange, les coefficients de dispersion, etc.), tels que le Modèle hybride de dispersion du panache (Hanna et Chang, 1992) ou le Programme de paramétrisation météorologique urbaine à échelle locale (Grimmond et Oke, 2002) afin de pouvoir effectuer des calculs infiniment plus complexes dans les domaines suivants : stabilité atmosphérique, statistiques de turbulence, flux de quantité de mouvement, de chaleur et de vapeur d'eau. Ces données permettent alors de prévoir la hauteur de mélange et la dispersion des polluants (COST 710, 1998; COST 715, 2001). En outre, on peut s'appuyer sur le rayonnement solaire plutôt que sur l'activité diurne des nuages dans nombre d'applications touchant à l'énergie solaire, au calcul de l'intensité normale de lumière du jour à l'intérieur des bâtiments, au confort des piétons, aux droits légaux à l'ensoleillement et bien d'autres domaines. Dans les stations automatiques, il est relativement simple et peu onéreux de prévoir en plus des mesures de rayonnement solaire.

Les conditions d'exposition des pyranomètres et autres capteurs de flux incidents sont relativement facilement réunies en ville. Les capteurs doivent être placés de niveau, ne pas être exposés aux vibrations, sans aucun obstacle au-dessus du plan horizontal de l'élément sensible, notamment absence d'éléments fixes (bâtiments, mâts, arbres et collines) ou éphémères (nuages émis par les conduits d'évacuation ou panaches de polluants). En conséquence, une plate-forme en hauteur, stable et accessible, par exemple le toit d'un grand immeuble, constitue souvent un site idéal. Il est parfois difficile d'éviter toute obstruction de courte durée des rayons directs du soleil qui viennent frapper sur le récepteur d'un radiomètre pointé vers le haut par un mât, une antenne, une hampe de drapeau ou autre structure similaire. Si tel était le cas, il conviendrait de décrire avec précision l'emplacement de l'obstacle et la durée type de son impact sur l'élément sensible (voir section 11.4). Les

méthodes à appliquer pour corriger ce type d'interférence sont mentionnées dans la partie I, chapitre 7. Il est en outre important de veiller à ce qu'il n'y ait aucune réflexion excessive sur des murs très clairs susceptible de s'étendre au-dessus de l'horizon local. Il est primordial de nettoyer les coupelles supérieures à intervalles réguliers. Dans des milieux fortement pollués, cela peut nécessiter une intervention quotidienne.

Il est également souhaitable de prendre en compte les autres flux radiatifs incidents en fonction du type d'agglomération, des applications potentielles et du coût des capteurs. Ces flux radiatifs (et les instruments destinés à les mesurer) sont les suivants : rayonnement solaire direct incident (pyrhéliomètre), rayonnement diffus du ciel (pyranomètre doté d'un écran annulaire ou d'un disque-écran sur monture équatoriale), rayonnement solaire ultraviolet (capteurs à large bande et à bande étroite, spectromètres) et rayonnement solaire infrarouge (pyrgéomètre). Tous ces flux radiatifs ont des applications utiles : rayonnement direct (coefficients d'atténuation de la pollution), rayonnement diffus (éclairage intérieur en lumière naturelle, panneaux solaires), rayonnement ultraviolet (absorbé par l'ozone, provoque des dégâts chez les humains, les plantes et les matériaux), et rayonnement infrarouge (surveillance des nuages nocturnes et renforcement des flux dus aux polluants et à l'effet d'îlot de chaleur).

11.3.7.2 Flux sortants et résultats

La réflexion du rayonnement solaire et l'émission et la réflexion du rayonnement infrarouge par la surface sous-jacente, et le résultat direct des flux radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde, ou toutes longueurs d'onde, sont rarement mesurés par les stations urbaines. Ce qui signifie que des propriétés importantes du système climatique urbain sont encore à étudier. L'albédo qui détermine si le rayonnement solaire est absorbé par le tissu urbain ou renvoyé à l'atmosphère et dans l'espace, demeure inconnu. Toute possibilité d'inverser la relation de Stefan-Boltzmann et de résoudre les équations fournissant la température radiative de surface est perdue. Il manque le rayonnement résultant critique qui favorise le réchauffement ou le refroidissement du tissu urbain, et les échanges d'eau et de chaleur entre la surface et la couche limite urbaine. Ce sont les données portant sur le rayonnement résultant à toutes les longueurs d'ondes qui font le plus défaut. Les résultats produits par un radiomètre bien entretenu destiné à mesurer le rayonnement résultant représentent une valeur inestimable pour mettre en œuvre un programme de prétraitement et remplacer la mesure des nuages.

La principale difficulté pour mesurer avec exactitude le rayonnement sortant réside dans l'exposition du radiomètre pointé vers le bas pour visualiser une zone représentative de la surface urbaine sous-jacente. La source radiative (équation 11.1 et figure 11.2) doit dans l'idéal «voir» un échantillon représentatif des principales surfaces contributrices au flux. Dans les cas standards d'exposition, définis dans les sections correspondantes de la partie I, chapitre 7, on estime que la bonne hauteur pour installer un capteur au-dessus d'une surface recouverte d'un gazon court est de 2 m. À cette hauteur, 90 % du flux prend naissance dans un cercle de 12 m de diamètre au sol. Il est clair qu'il faut disposer d'une hauteur infiniment plus grande au-dessus d'une zone urbaine pour pouvoir échantillonner une zone contenant un échantillon suffisant des différentes facettes de la surface pour être représentative de cette zone climatique urbaine. Si l'on prend le cas d'un radiomètre déployé à une altitude de 20 m (au sommet d'un mât de 10 m installé sur un bâtiment haut de 10 m), dans un quartier fortement urbanisé, la zone source de 90 % du flux présente un diamètre de 120 m au niveau de sol. Ceci peut sembler suffisant pour «voir» plusieurs bâtiments et routes, mais il faut également tenir compte du fait que le système est tridimensionnel et non quasi plat comme une surface herbeuse. Dans l'exemple cité, au niveau de toits, la zone source possède un diamètre de 60 m seulement, et l'instrument ne peut voir qu'un nombre de bâtiments relativement restreint.

La question qui se pose est de savoir si le capteur peut «voir» un éventail approprié de surfaces actives du point de vue climatique. Ceci signifie que le capteur ne doit pas voir seulement un ensemble adéquat de surfaces vues de dessus, mais également échantillonner des portions bien choisies de toits, de murs et de sol, notamment des parties précises de chacune d'entre elles exposées au soleil ou à l'ombre. Cette tâche n'est pas facile dans la mesure où elle dépend de la structure de la surface et de la position à la fois du capteur et du soleil dans l'espace au-dessus d'un groupe de capteurs. Soux, Voogt et Oke, 2004, ont mis au point un modèle pour calculer ces différentes portions pour des groupes géométriques de type urbain relativement simples. Toutefois, il convient de poursuivre les études et élaborer des directives spécifiques aux différents types de zones climatiques urbaines. Il semblerait qu'il faille prévoir une hauteur de déploiement du capteur supérieure à celle utilisée dans les mesures de turbulence. La mise en œuvre de l'équation 11.1 (voir figure 11.2) démontre clairement la nature non-linéaire des effets liés à la zone source radiative. Une pondération plus grande des surfaces plus proches du mât signifie que l'environnement immédiat est le paramètre le plus important à prendre

en compte. Dans l'exemple précédent, dans lequel le radiomètre est déployé à une hauteur de 20 m sur un bâtiment haut de 10 m, 50 % du signal au niveau du toit provient d'un cercle de seulement 20 m de diamètre (correspondant probablement à un seul bâtiment). Si le toit de ce bâtiment, ou toute autre surface sur laquelle est monté le mât, possède des propriétés radioactives anormales (albédo, émissivité ou température), cela a une incidence disproportionnée sur le flux supposé représentatif d'une zone plus large. En conséquence, il convient d'éviter les toits comportant d'importantes zones vitrées ou métalliques, ou de couleur inhabituellement sombre ou claire, ou ceux conçus pour retenir de l'eau stagnante.

Les problèmes liés aux radiomètres pointés vers le bas à grande hauteur sont les suivants : a) difficile de vérifier si l'élément sensible est bien de niveau ; b) veiller impérativement à ce qu'aux angles zénithaux importants, l'élément sensible ne « voit » pas le rayonnement solaire direct ou le rayonnement incident de grandes longueurs d'onde émis par le ciel ; c) envisager la possibilité de corriger les résultats afin de prendre en compte la divergence du flux radiatif dans la couche d'air située entre l'instrument et surface étudiée. Afin d'éliminer le rayonnement solaire externe ou de grandes longueurs d'onde proche de l'horizon, il peut s'avérer nécessaire d'installer un écran annulaire étroit destiné à réduire le champ de vision de quelques degrés inférieur à 2π . Il faudra pour cela apporter une légère correction aux valeurs lues pour tenir compte de la donnée manquante relative au rayonnement solaire diffus (partie I, chapitre 7, annexe 7.E en cas d'emploi d'un écran annulaire) ou du signal supplémentaire de grandes longueurs d'onde émis par l'anneau.

Si l'orientation des capteurs est inversée, leur dos est exposé à la chaleur du soleil, ce qui présente un risque d'erreur. Pour éviter ce phénomène, il convient d'utiliser une forme à définir de protection et d'isolation. L'entretien des coupelles de l'instrument et l'élimination des traces d'eau ou de glace peuvent également s'avérer plus difficiles. Dans la mesure où on ne peut pas observer la vitesse et l'efficacité de la ventilation à une certaine hauteur, on veillera à privilégier des instruments ne nécessitant aucune ventilation. La possibilité d'abaisser le mât pour faciliter le nettoyage, le remplacement du produit déshydratant ou des coupelles en polyéthylène et le réglage de l'instrument peut constituer un avantage.

Il est recommandé :

- d'installer les radiomètres, récepteur pointé vers le bas, à une altitude au moins égale à celle du capteur de turbulences (à savoir une hauteur égale à $2 z_H$) et de préférence plus ;

- de faire en sorte que les propriétés radiatives de l'environnement immédiat du mât soient représentatives du quartier urbain étudié.

11.3.8 Durée d'ensoleillement

L'atmosphère polluée des villes provoque une réduction du nombre d'heures d'ensoleillement par rapport à la campagne environnante ou aux valeurs pré-urbaines (Landsberg, 1981). Les recommandations relatives aux instruments, méthodes et exposition données dans la partie I, chapitre 8, s'appliquent aux stations implantées en milieu urbain.

11.3.9 Visibilité et portée optique météorologique

L'étude de l'impact des zones urbaines sur la visibilité et la portée optique météorologique (POM) peut s'avérer complexe. En effet, si les polluants tendent à réduire la valeur de ces deux paramètres dans la mesure où ils ont une incidence sur l'atténuation de la lumière et accentuent certains effets liés au brouillard, aux îlots de chaleur et d'humidité urbains, ils permettent souvent de diminuer la fréquence et l'intensité du brouillard et des nuages bas. Ces données revêtent un intérêt pratique considérable dans des domaines tels que l'aviation, le transport routier et fluvial et les communications optiques. Il est donc conseillé de prévoir ce type d'observations au niveau des stations urbaines.

La visibilité optique est souvent restreinte en ville. S'il est vrai qu'un grand nombre d'objets et de lumières peuvent servir de cibles d'alignement, il est souvent difficile d'obtenir une visibilité directe sans obstacle à la hauteur recommandée de 1,5 m. Le recours à une plate-forme surélevée ou au niveau supérieur d'un bâtiment est considéré comme non standard et n'est donc pas recommandé. Les observations au niveau des toits peuvent également être affectées par la scintillation causée par des toits chauffés ou le dégagement de vapeur d'eau sur des toits mouillés en train de sécher, les émissions de polluants ou les nuages d'eau produits par les cheminées et autres conduits d'évacuation.

Les instruments destinés à mesurer la portée optique météorologique, tels que les transmissomètres et les diffusomètres, fonctionnent généralement bien en milieu urbain. Ils n'ont pas besoin d'une grande portée et donnent de bons résultats si l'optique est maintenue en bon état de propreté. Naturellement, il convient de déployer les instruments dans un lieu représentatif de l'atmosphère environnante, mais les exigences ne sont pas plus sévères que celles relatives aux instruments placés dans la canopée urbaine. Il est parfois utile de connaître, pour certaines

applications, la variation de hauteur de la POM, par exemple la position du sommet du brouillard ou de la base des nuages.

11.3.10 Évaporation et autres flux

L'urbanisation entraîne généralement une réduction de l'évaporation essentiellement due au fait que les éléments bâtis rendent les sols imperméables et contribuent à la disparition de la végétation. Toutefois, dans certaines régions naturellement sèches, on peut observer une augmentation de l'évaporation si l'on achemine de l'eau d'ailleurs pour irriguer les espaces verts en ville.

Il n'existe qu'un très petit nombre de stations de mesure d'évaporation dans les zones urbaines. On peut le comprendre car il est pratiquement impossible d'interpréter les valeurs d'évaporation mesurées dans la canopée urbaine à l'aide d'atmomètres, de bacs d'évaporation ou de lysimètres. Selon les précisions données dans la partie I, chapitre 10, ces mesures doivent être réalisées sur un site représentatif de la zone étudiée, libre de tout obstacle. Si cela s'avère impossible, ce dernier devra être implanté à une distance équivalente à cinq fois la hauteur de l'obstacle, ou dix fois la hauteur d'un groupe d'obstacles, et l'instrument ne devra en aucun cas être installé à l'ombre, sur un socle en béton, une surface asphaltée, ou toute autre surface dure susceptible de provoquer le rejaillissement de l'eau. En outre, les surfaces de ces instruments sont supposées agir de la même manière que la végétation ou les surfaces d'eau naturelles. Ces surfaces ne sont probablement pas représentatives de l'environnement d'un site urbain. En conséquence, elles sont exposées à un phénomène de micro-advection susceptible d'accélérer de façon anormale l'évaporation.

Prenons le cas d'un bac d'évaporation installé depuis longtemps, initialement sur un site semi-aride ensuite converti en terres agricoles irriguées, puis en zone suburbaine avant de se transformer en zone fortement urbanisée. Les premiers enregistrements d'évaporation donnent des valeurs très élevées, car il s'agit d'une surface d'eau en plein air dans un environnement chaud et sec. En conséquence, alors que l'évaporation réelle dans cette région est très faible, les phénomènes d'advection augmentent les pertes du bac. L'introduction de l'irrigation rend les conditions plus fraîches et plus humides, les valeurs relevées dans le bac chutent, mais l'évaporation réelle est élevée. Alors que l'urbanisation inverse fortement les effets des changements environnementaux et réduit la vitesse du vent près du sol, les pertes du bac augmentent alors que l'évaporation réelle a toutes les chances de diminuer. En conséquence, tout au

long de ce processus, l'évaporation du bac et l'évaporation réelle sont probablement en opposition de phase. À l'époque agricole, on a peut-être appliqué un coefficient de bac pour convertir les données relevées dans le bac en données types sur herbe courte ou cultures. En revanche, il n'existe pas de coefficient approprié pour convertir l'évaporation du bac en évaporation urbaine, même si ces données ne sont pas faussées par la complexité de l'environnement dans la canopée urbaine. En résumé, il n'est pas recommandé de faire appel à des instruments classiques pour mesurer l'évaporation dans la canopée urbaine.

Les dimensions et l'hétérogénéité des zones urbaines rendent irréalisable l'emploi de lysimètres en grandeur réelle (par exemple, à au moins 100-150 m d'un changement d'environnement). Les micro-lysimètres peuvent mesurer l'évaporation de surfaces particulières, mais ils sont toujours adaptés à leur environnement. Ces instruments doivent faire l'objet d'une grande attention, notamment il convient de procéder au renouvellement du bloc monolithique de sol pour éviter toute déshydratation, et ils ne sont pas adaptés aux observations de routine sur le long terme.

On peut obtenir des données relatives à l'évaporation et autres flux turbulents (quantité de mouvement, chaleur sensible, dioxyde de carbone) moyennées spatialement à partir des observations réalisées au-dessus de la sous-couche de rugosité. Plusieurs de ces flux présentent un intérêt pratique bien plus grand dans les zones urbaines que dans nombre de zones rurales. Par exemple, on a besoin du flux vertical de quantité de mouvement horizontale, ainsi que de statistiques complètes et de spectres de vent, pour déterminer la charge exercée par le vent sur les structures et la dispersion des polluants atmosphériques. Le flux de chaleur sensible est une donnée essentielle pour calculer la stabilité atmosphérique (par exemple, le nombre de Richardson de flux et la longueur d'Obukhov) et l'épaisseur de la couche urbaine de mélange. Il est recommandé d'appliquer les méthodes de mesure des flux turbulents avec réponse rapide ou de calcul de l'écart-type, plutôt que les méthodes de mesure des gradients longitudinaux. Les instruments adaptés à ce type de mesure sont : les anémomètres acoustiques, les hygromètres infrarouges, les analyseurs de gaz et les scintillomètres. Les capteurs doivent être exposés de la même manière que les capteurs de vent : au-dessus de la sous-couche de rugosité, mais en dessous de la couche limite interne de la zone climatique urbaine étudiée. Ces mesures, ici encore, s'appuient sur une «empreinte» de flux suffisamment large pour être représentative de la zone locale considérée.

Si vous ne disposez pas de moyens financiers et techniques suffisants pour procéder à de telles mesures de flux, vous pouvez faire appel à un programme de pré-traitement météorologique, par exemple la Méthode de limitation de l'ozone, la Méthode hybride de dispersion du panache ou au programme de paramétrisation météorologique urbaine à l'échelle locale (voir section 11.3.7) pour obtenir des valeurs atmosphériques représentatives de l'évaporation urbaine et du flux de chaleur. Ces programmes exigent uniquement de réaliser des observations spatiales représentatives du rayonnement solaire incident, de la température et de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent, une estimation générale des propriétés moyennes des surfaces telles que l'albédo, l'émissivité, la longueur de rugosité, ainsi qu'une évaluation des parcelles de terrain végétalisées, bâties ou irriguées d'un quartier urbain. Les observations liées à la vitesse du vent doivent bien évidemment satisfaire les recommandations énoncées dans la section 11.3.5. Dans l'idéal, il faudrait mesurer la température et l'humidité de l'air au-dessus de la sous-couche de rugosité. Toutefois, on peut généralement admettre que les valeurs relatives à la canopée urbaine puissent suffire car ces programmes sont peu sensibles à ces variables.

11.3.11 **Humidité du sol**

Une bonne connaissance de la teneur en humidité du sol constitue une donnée intéressante pour les jardiniers ou dans les calculs d'évaporation par exemple. Les différentes configurations nettement marquées, observées sur les images thermiques obtenues par télédétection démontrent l'importance que revêt ce paramètre d'un point de vue thermique dans les paysages urbains. De jour, chaque parcelle végétalisée ou terrain irrigué est notablement plus fraîche qu'un terrain bâti, un sol asphalté ou nu. Toutefois, l'échantillonnage permettant d'obtenir des valeurs représentatives de l'humidité du sol constitue une tâche ardue.

Certaines des difficultés évoquées ici s'expliquent par le fait que de vastes surfaces en milieu urbain sont rendues totalement imperméables en raison des éléments asphaltés et bâties qui les recouvrent, et que la plus grande partie du sol exposé a été fortement perturbée par le passé par des activités de construction ou suite à l'abandon des terrains. Le «sol» est alors souvent constitué de débris d'anciens bâtiments ou de matériaux routiers, ou a été importé de sites éloignés pour remplacer le sol existant ou servir de matériau de remblayage. En outre, les fuites d'eau localisées dues à une rupture de canalisation d'eau ou d'égout qui s'infiltreront dans

le sol, ou l'irrigation peuvent avoir une incidence sur l'humidité du sol. On obtient alors un champ d'humidité du sol urbain très hétérogène, avec des parcelles totalement sèches voisinant avec des pelouses trop arrosées. En conséquence, alors qu'on peut se faire une certaine idée de l'humidité du sol à l'échelle locale dans des zones peu urbanisées, ou dans les endroits où un paysage semi-naturel a pu être conservé, il est pratiquement impossible de décrire ce paramètre dans la plupart des quartiers urbains. Dans ce cas, mieux vaut parfois s'appuyer sur les valeurs relevées à la campagne, lesquelles représentent une valeur régionale générale, plutôt que de n'avoir aucune estimation du tout de l'humidité du sol.

11.3.12 **Temps présent**

Si des observateurs sont présents dans les stations ou si celles-ci sont équipées d'instruments classiques, l'observation de phénomènes météorologiques en cours (givre, glaces de surface, brouillard, tempêtes de poussière ou de sable, trombes, tonnerre, éclairs) peut présenter un intérêt, surtout si cela a une incidence concrète sur l'efficacité ou la sécurité d'activités urbaines comme les transports par exemple. Les éventuelles archives d'images enregistrées par cybercaméra constituent des éléments d'appréciation utiles pour étudier les nuages, l'évolution à court terme des nuages accompagnant les fronts atmosphériques, les fluctuations des bancs de brouillard, l'élévation et l'abaissement de la base des nuages, l'arrivée de fronts de tempête de poussière ou de sable.

11.3.13 **Nuages**

Il est rare d'observer la couverture nuageuse dans les grandes agglomérations, pourtant cette information peut s'avérer très utile. Toutes les recommandations relatives aux méthodes et instruments présentées dans la partie I, chapitre 15 peuvent s'appliquer aux zones urbaines. Le grand nombre et l'intensité des sources lumineuses en ville, associées à une atmosphère brumeuse, parfois polluée, rendent plus difficiles les observations visuelles. Dans la mesure du possible, le site d'observation devra être éloigné des zones particulièrement éclairées.

11.3.14 **Composition de l'atmosphère**

La surveillance de la pollution atmosphérique joue un rôle de plus en plus important en milieu urbain. Mais il s'agit d'une autre discipline, laquelle ne sera pas traitée dans le présent chapitre. La partie I, chapitre 17, traite de ce thème dans le contexte plus vaste de la Veille de l'atmosphère globale.

11.3.15 Techniques d'obtention des profils de la couche limite urbaine

L'influence des villes s'étendant dans toute la couche limite planétaire (figure 11.1), il convient de faire appel à des tours et des mâts pour pouvoir réaliser des observations au-dessus de la sous-couche de rugosité. On s'intéressera plus particulièrement aux effets sur un champ de vent et la structure verticale de la température, notamment sur l'épaisseur de la couche de mélange, et au rôle que ces paramètres cumulés jouent dans la dispersion des polluants.

Toutes les techniques spéciales d'obtention de profils décrites dans la partie II, chapitre 5, s'appliquent aux zones urbaines. Les sondes acoustiques (sodars) peuvent se révéler d'une grande utilité, toutefois, il faut bien reconnaître que ceux-ci souffrent de deux inconvénients majeurs : premièrement, les signaux qu'ils émettent sont souvent perturbés par diverses sources urbaines de bruit (trafic terrestre et aérien, chantiers et même tondeuses à gazon) et deuxièmement, leur exploitation peut être interdite s'il est démontré qu'ils constituent une gêne pour le voisinage. Les radars profileurs de vent, les systèmes de sondage radio-acoustiques, les radiomètres à hyperfréquences, les profileurs de température à hyperfréquences, les radars à laser (lidars) et les célosmètres modifiés sont tous des systèmes adaptés à la surveillance de l'atmosphère urbaine à condition de pouvoir éviter les perturbations liées aux échos produits par le sol. De même, on peut utiliser des ballons de poursuite des vents, des radiosondes dans la couche limite (minisondes) et des ballons captifs transportant des instruments avec des taux de réussite satisfaisants tant que les autorités du trafic aérien en autorisent l'utilisation. Les tours et mâts instrumentés peuvent constituer un excellent support pour installer des capteurs au-dessus des toits et dans la sous-couche d'inertie. Des structures de très grande hauteur peuvent permettre de réaliser des mesures dans la couche de mélange. Toutefois, il convient de réaffirmer les précautions à prendre énoncées dans la partie II, chapitre 5, section 5.3.3, relatives à l'éventuelle perturbation des propriétés atmosphériques causée par la structure porteuse. Les bâtiments élevés peuvent sembler un moyen adapté pour atteindre la couche limite urbaine, encore faut-il bien évaluer les effets liés aux perturbations qu'ils peuvent provoquer et mettre en œuvre les mesures qui s'imposent pour les éviter, au risque sinon de rendre inutile le déploiement des capteurs et éventuellement obtenir des résultats de nature à induire en erreur.

11.3.16 Observations par satellite

La télédétection par satellite avec une bonne résolution dans l'infrarouge peut présenter un intérêt

pour observer des zones urbaines étendues, mais ce thème n'entre pas dans le cadre de ce chapitre. Vous trouverez un certain nombre d'informations dans la partie II, chapitre 8 et dans l'étude réalisée par Voogt et Oke, 2003.

11.4 MÉTADONNÉES

Il est absolument indispensable que les stations puissent disposer d'une documentation précise et complète regroupant toutes les métadonnées enregistrées par la station (voir partie I, chapitre 1) afin que l'utilisateur final puisse n'avoir aucun doute sur les conditions dans lesquelles les données ont été enregistrées, recueillies et transmises, et qu'il puisse en tirer des conclusions précises (Guidelines on Metadata and Homogenization, 2003a). On peut affirmer que cela est encore plus essentiel pour une station urbaine, les sites urbains présentant des structures exceptionnellement complexes avec une plus forte propension à évoluer. Cette complexité rend chaque site véritablement unique, alors que des sites bien choisis en rase campagne sont relativement conformes au modèle standard. Toute évolution implique que les observations réalisées par les sites soient dynamiques et les documents fréquemment actualisés. Dans la figure 11.6, on suppose que les recommandations minimales sur les métadonnées énoncées dans les directives de l'OMM (Guidelines on Climate Metadata and Homogenization, 2003a) sont toutes satisfaites et que, de préférence, un certain nombre des meilleures pratiques recommandées sont mises en œuvre. Les auteurs mettent ici l'accent sur les caractéristiques particulières du milieu urbain à inclure dans les métadonnées, en particulier celles mentionnées aux points «environnement local» et «événements historiques» ci-dessous.

11.4.1 Environnement local

Ainsi que l'explique la section 11.1.1, les instruments des stations urbaines doivent être installés au-dessus comme à l'intérieur de la canopée urbaine. En conséquence, la description de l'environnement immédiat doit prendre en compte à la fois la micro-échelle et l'échelle locale. Conformément aux directives de l'OMM sur les métadonnées et leur homogénéisation (Guidelines on Climate Metadata and Homogenization, 2003a), lesquelles seront adaptées afin de prendre en compte les caractéristiques du milieu urbain, il est recommandé aux stations de consigner les données descriptives suivantes :

- Une carte à échelle locale et mésoéchelle (~1:50 000) comme illustrée sur la figure 11.6(a), éventuellement mise à jour pour décrire les grands changements intervenus dans le pay-

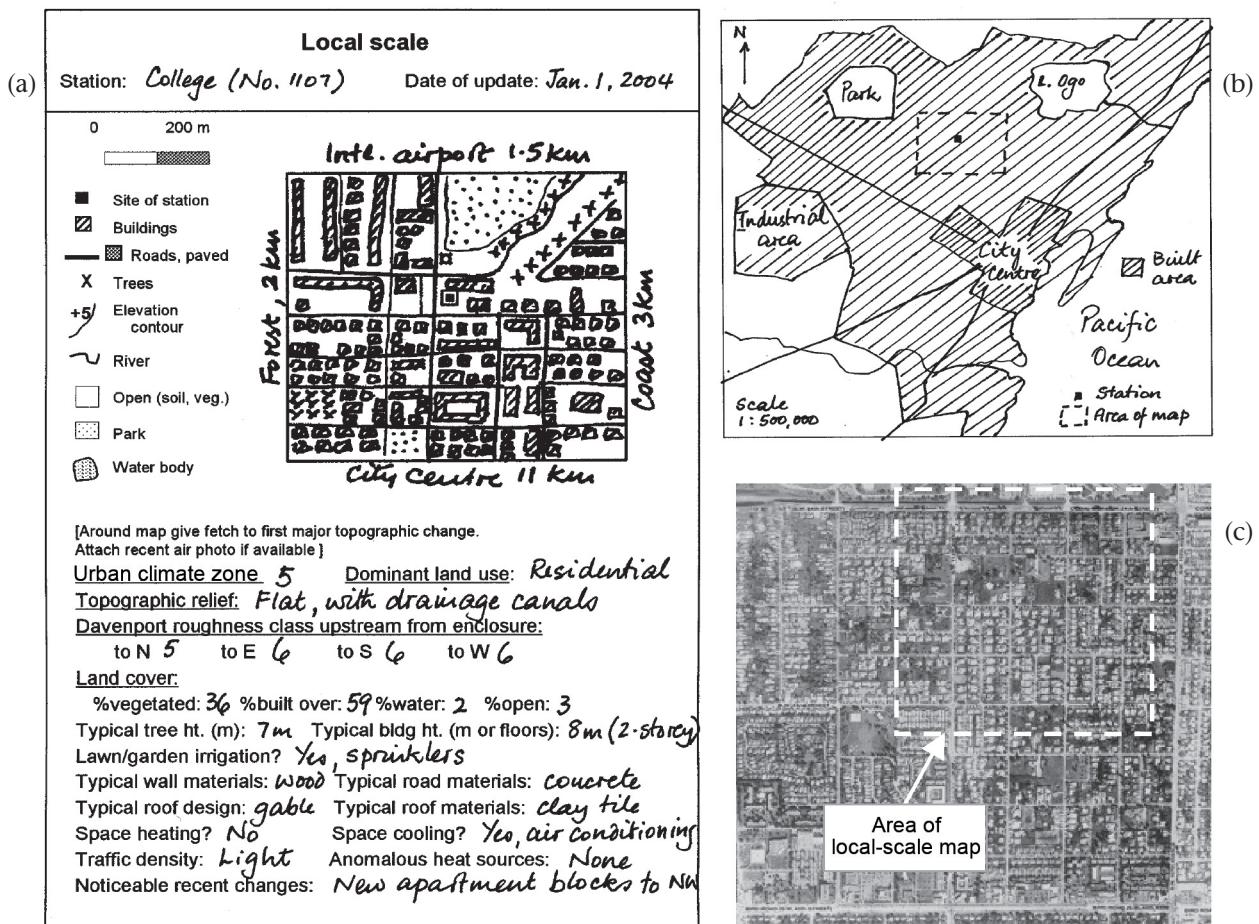


Figure 11.6. Informations minimales nécessaires pour décrire l'environnement à l'échelle locale d'une station en milieu urbain. Ces informations comprennent : a) un modèle permettant de documenter l'environnement local ; b) un croquis permettant de situer la station dans une zone urbaine plus large ; et c) une photographie aérienne.

sage urbain (par exemple conversion d'un espace libre en zone résidentielle, construction d'un centre commercial ou d'un aéroport, construction de nouvelles tours, destruction d'une parcelle boisée, assèchement d'un lac, création d'un bassin de rétention). Idéalement, il faudra également fournir une photographie aérienne de la zone et un croquis simple (au 1:500 000 ou 1:1 000 000) destiné à indiquer le positionnement de la station par rapport au reste de la zone urbanisée (figures 11.6(b) et (c)), et les principales caractéristiques géographiques telles que les grandes étendues d'eau, les montagnes et les vallées, ou un changement d'écosystème (désert, marécage, forêt). Un cliché aérien oblique peut s'avérer particulièrement éclairant car il permet d'apprécier la hauteur des bâtiments et des arbres. Les images infrarouges aériennes ou satellites, s'il est possible d'en disposer, peuvent être très instructives dans le cadre de la surveillance du microclimat. Par exemple, des surfaces relativement

froides le jour sont généralement un indicateur d'humidité ou de présence de matériaux présentant une émissivité de surface anormale. Des zones plus chaudes que la normale peuvent être très sèches, avoir un albédo faible ou bénéficier d'une excellente isolation. La nuit, une relative froideur témoigne d'une bonne isolation, alors qu'une chaleur relative témoigne du contraire, ou alors indique la présence d'un matériau à forte admittance thermique qui restitue la chaleur emmagasinée pendant la journée ou d'une source anormale de chaleur d'origine anthropique. Les zones climatiques urbaines et les classes de rugosité de Davenport peuvent être évaluées à l'aide des tableaux 11.1 ou 11.2.

- b) Un croquis à micro-échelle (~1:5 000), selon les directives relatives aux métadonnées, mis à jour chaque année (figure 11.7(a));
- c) Une cartographie de l'horizon établie à l'aide d'un clinomètre et un relevé à la boussole dans un cercle autour de l'abri (comme illustré dans

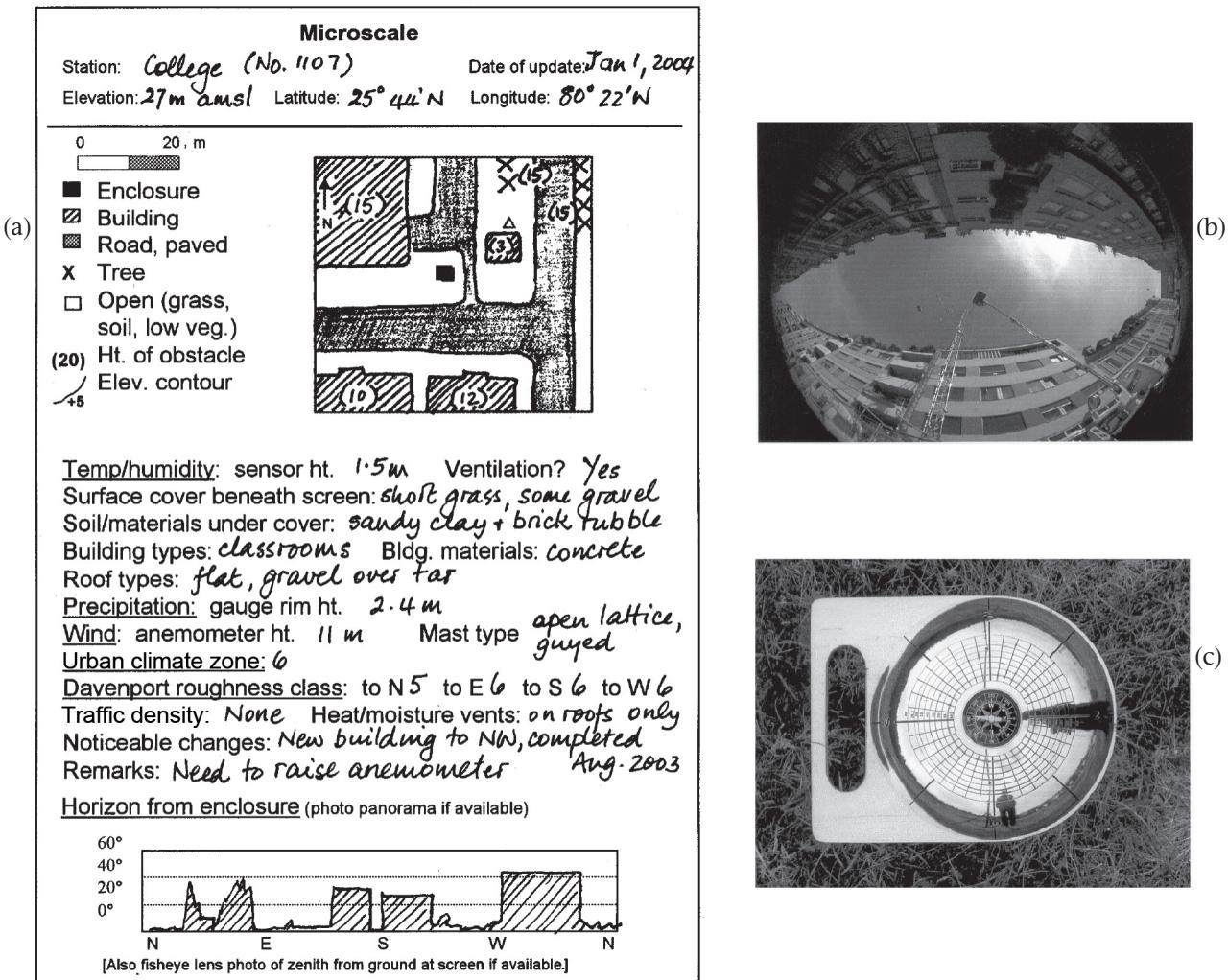


Figure 11.7. Informations nécessaires pour décrire l'environnement à très petite échelle d'une station climatologique en milieu urbain. Ces informations comprennent : a) un modèle de fichier contenant des métadonnées ; b) un exemple de photographie du couloir d'une rue prise avec un objectif grand-angle pour illustrer l'obstruction de l'horizon ; et c) un réflecteur hémisphérique fourni par le Service météorologique national du Royaume-Uni et placé sur un pluviomètre.

le schéma à la base du modèle, figure 11.7(a), et une photographie prise avec un objectif dit œil-de-poisson pointé à la verticale au zénith, le dos de l'appareil étant posé sur le sol à proximité de l'abri, de sorte qu'aucune portion de ciel ne soit masquée par celui-ci (figure 11.7(b)). Si vous ne disposez pas d'un tel objectif, la méthode la plus simple est de prendre une photographie d'un réflecteur hémisphérique (figure 11.7(c)). Il convient de procéder à une mise à jour chaque année ou plus fréquemment si l'on observe une évolution importante du niveau d'obstruction de l'horizon, construction ou démolition d'un immeuble ou arbres arrachés à proximité ;

d) Des photographies prises aux quatre points cardinaux par rapport à l'abri des instruments,

et à l'emplacement des tours supportant les autres instruments ;

e) Un croquis à micro-échelle de l'abri contenant les instruments, mis à jour chaque fois que les instruments sont déplacés ou à l'occasion de tout autre changement important ;

f) Si certaines mesures (vent, rayonnement) sont réalisées à une certaine distance de l'abri de la station (sur des mâts, au sommet des toits, sites plus dégagés) répétez les opérations b) à d) ci-dessus pour chaque site.

11.4.2 Évènements historiques

Les agglomérations sont soumises à de nombreuses occasions de changement, notamment dues à l'évolution de la législation municipale susceptible de

modifier les règles d'occupation des sols, ou la hauteur des bâtiments, ou les types de matériaux et les techniques de construction autorisés, les règlements et arrêtés relatifs à l'environnement, l'arrosage ou encore la circulation. Les changements particulièrement radicaux apportés à un quartier peuvent être le résultat de décisions d'aménagement prises au niveau central en faveur de la rénovation urbaine. Des modifications plus organiques de la nature d'un quartier peuvent s'expliquer par les migrations de groupes de populations, ou la transformation du quartier en zone résidentielle ou en zone d'activité. La zone urbaine peut devenir un centre de conflit et de destruction. Ce type d'événements doit être répertorié pour permettre aux futurs utilisateurs des données de comprendre une partie du contexte à l'origine de l'éventuelle évolution du climat urbain.

11.4.3 **Respect des autres recommandations de l'OMM**

Toutes les autres recommandations de l'OMM relatives à la documentation des métadonnées, notamment les numéros d'identification des stations, les données géographiques, l'exposition et les différents types d'instruments, le montage et la protection des instruments, l'enregistrement et la transmission des données, les pratiques d'observation, de stockage et de mise à disposition des métadonnées, ainsi que le traitement des données, devront être respectées dans les stations urbaines.

11.5 **ÉVALUATION DES EFFETS URBAINS**

L'étude du temps et du climat en milieu urbain offre un point de vue presque unique. Les populations s'intéressent au rôle que jouent les êtres humains dans l'évolution de l'atmosphère urbaine. En conséquence, contrairement aux autres milieux étudiés, pour lesquels on se contente d'étudier l'atmosphère pour elle-même, on cherche à connaître les effets de l'urbanisation sur l'atmosphère des villes. Cela implique d'évaluer les éventuels changements de variables météorologiques à mesure qu'une zone urbaine se développe, par rapport à ce qui se serait produit si les bâtiments n'avaient pas été construits. Il est fondamentalement impossible de répondre à cette question une fois que l'espace a été bâti, et même si aucune construction n'avait été réalisée, le paysage aurait parfaitement pu évoluer par rapport à ce qui existait auparavant (en raison par exemple d'un changement d'activité humaine, agriculture ou sylviculture). L'évaluation des effets urbains se heurte donc à des problèmes de méthodologie et la «vérité» n'existe pas. On doit se contenter d'approximations. Que la station soit implantée de manière isolée ou

fasse partie d'un réseau, il est recommandé de se reporter à l'analyse réalisée par Lowry (1977), et Lowry et Lowry (2001) pour évaluer les effets du milieu urbain sur le temps et le climat.

11.6 **RÉSUMÉ DES POINTS IMPORTANTS À RESPECTER DANS LES STATIONS URBAINES**

11.6.1 **Lignes directrices**

Les directives relatives aux stations climatologiques sont plutôt strictes et sont donc inadaptées aux conditions urbaines d'implantation. Mieux vaut donc s'appuyer sur des principes directeurs plutôt que sur des règles strictes et adopter une démarche souple. Cela signifie que diverses solutions peuvent être mises en œuvre pour observer les différentes propriétés atmosphériques et que toutes les mesures de terrain ne sont pas nécessairement réalisées au même endroit.

L'environnement des stations urbaines évolue avec le développement de la zone, et c'est pourquoi la mise à jour des métadonnées est aussi importante que le recueil des données météorologiques. Et sans une bonne description des stations, il est impossible de relier les mesures au milieu environnant.

11.6.2 **Sélection des sites**

L'une des premières étapes importantes dans la sélection des sites d'implantation de stations urbaines consiste à évaluer la nature physique de la surface urbaine en s'appuyant sur une classification des zones climatiques, et ce afin de pouvoir repérer les zones d'homogénéité.

Les différents types de surfaces urbaines constituent une zone urbaine. Il faut disposer de multiples stations pour pouvoir se faire une bonne idée du climat d'une ville. Il convient de sélectionner des sites sur lesquels il sera possible d'analyser l'air prélevé sur une surface urbaine relativement homogène et qui seront donc représentatifs d'une zone climatique donnée. Il faudra veiller à ce que les effets micro-climatiques ne viennent pas fausser le résultat des mesures du climat à l'échelle locale.

11.6.3 **Mesures**

En matière de mesures, il conviendra de prendre en compte les principaux points suivants :

- Les mesures de température et d'humidité de l'air réalisées dans la canopée urbaine peuvent être représentatives au niveau local si le site a

- éété soigneusement sélectionné. Si ces variables sont observées au niveau des toits, notamment au-dessus de la sous-couche de rugosité, il n'existe aucun lien établi entre ces dernières et celles relevées dans la canopée urbaine ;
- b) Les mesures de vent et de flux turbulent doivent être réalisées au-dessus de la sous-couche de rugosité, mais à l'intérieur de la couche limite interne de la zone climatique urbaine sélectionnée. Ces mesures doivent établir que « l'empreinte » de la surface prise en compte dans les observations est représentative de la zone climatique. En ce qui concerne le vent, il est possible de lier l'écoulement enregistré à ce niveau à celui enregistré dans la canopée ;
- c) Les observations des précipitations peuvent être effectuées soit près du sol sur un site dégagé, soit au-dessus de la sous-couche de rugosité, et corrigées en fonction des mesures de vent réalisées en parallèle ;
- d) À l'exception des mesures du rayonnement solaire incident, il convient d'éviter d'installer les instruments sur les toits, à moins de le faire sur un grand mât ;
- e) Les mesures des flux de rayonnement résultant et ascendant doivent être réalisées à des altitudes permettant d'échantillonner correctement les différents types de surfaces et leur orientation caractéristique de la zone considérée.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Arya, P.S., 2001 : *Introduction to Micrometeorology*, Academic Press, New York.
- Auer, A.H. Jr., 1978 : Correlation of land use and cover with meteorological anomalies, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, N° 5, p. 636–643.
- Britter, R.E. et S.R. Hanna, 2003 : Flow and dispersion in urban areas, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 35, p. 469–496.
- Christen, A., 2003 : (Communication personnelle), Institut de météorologie, climatologie et télédétection, Université de Bâle.
- Christen, A., R. Vogt, M.W. Rotach et E. Parlow, 2002 : *First results from BUBBLE I : Profiles of fluxes in the urban roughness sublayer*, Actes du quatrième colloque sur l'environnement urbain (Norfolk, Virginie), American Meteorological Society, Boston, p. 105–106.
- COST-710, 1998 : *Rapport final: Harmonisation of the Pre-processing of Meteorological Data for Atmospheric Dispersion Models*, Commission européenne, EUR 18195 EN.
- COST-715, 2001 : *Preparation of Meteorological Input Data for Urban Site Studies*, Commission européenne, EUR 19446 EN.
- Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke et J. Wieringa, 2000 : *Estimating the roughness of cities and sheltered country*, Actes de la douzième Conférence sur la climatologie appliquée (Asheville, Caroline du Nord), American Meteorological Society, Boston, p. 96–99.
- DePaul, F.T. et C.M. Shieh, 1986 : Measurements of wind velocity in a street canyon, *Atmospheric Environment*, vol. 20, p. 455–459.
- Ellefsen, R., 1991 : Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten US cities, *Energy and Buildings*, vol. 16, p. 1025–1049.
- Garratt, J.R., 1992 : *The Atmospheric Boundary Layer*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Gill, G.C., L.E. Olsson, J. Sela et M. Suda, 1967 : Accuracy of wind measurements on towers or stacks, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 48, p. 665–674.
- Grimmond, C.S.B. et T.R. Oke, 1999 : Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 38, N° 9, p. 1262–1292.
- Grimmond, C.S.B. et T.R. Oke, 2002 : Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS), *Journal of Applied Meteorology*, vol. 41, N° 7, p. 792–810.
- Halitsky, J., 1963 : Gas diffusion near buildings, *Transactions of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*, vol. 69, p. 464–485.
- Hanna, S.R. et J. C. Chang, 1992 : Boundary-layer parameterizations for applied dispersion modeling over urban areas, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 58, p. 229–259.
- Hunt, J.C.R., C.J. Abell, J.A. Peterka et H. Woo, 1978 : Kinematical studies of the flow around free or surface-mounted obstacles : Applying topology to flow visualization, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 86, p. 179–200.
- Kljun, N., M. Rotach et H.P. Schmid, 2002 : A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 103, N° 2, p. 205–226.
- Kljun, N., P. Calanca, M.W. Rotach et H.P. Schmid, 2004 : A simple parameterization for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 112, p. 503–523.
- Landsberg, H.E., 1981 : *The Urban Climate*. Academic Press, New York.
- Lowry, W.P., 1977 : Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 16, N° 2, p. 129–135.
- Lowry, W.P. et P.P. Lowry, 2001 : *Fundamentals of Biometeorology, volume 2 – The Biological Environment*, chapitre 17, Peavine Publications, St Louis, Missouri, p. 496–575.
- Nakamura, Y. et T.R. Oke, 1988 : Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon, *Atmospheric Environment*, 22, p. 2691–2700.
- Oke, T.R., 1981 : Canyon geometry and the nocturnal heat island: Comparison of scale model and field observations, *Journal of Climatology*, vol. 1, N° 3, p. 237–254.
- Oke, T.R., 1982 : The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 108, N° 455, p. 1–24.
- Oke, T.R., 1984 : Methods in urban climatology, *Applied Climatology* (W. Kirchofer, A. Ohmura et W. Wanner, éd.), Zürcher Geographische Schriften, vol. 14, p. 19–29.
- Oke, T.R., 1988a : The urban energy balance, *Progress in Physical Geography*, vol. 12, p. 471–508.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Oke, T.R., 1988b : Street design and urban canopy layer climate, *Energy and Buildings*, vol. 11, p. 103–113.
- Oke, T.R., 1997 : Urban environments, *The Surface Climates of Canada* (W.G. Bailey, T.R. Oke et W.R. Rouse, éd). McGill-Queen's University Press, Montréal, p. 303–327.
- Organisation météorologique mondiale, 1983 : *Guide des pratiques climatologiques* (2e éd.), OMM–N° 100, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : *Règlement technique*, vol. I, OMM –N° 49, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel des Codes*. OMM –N° 306, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003a : *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (E. Aguilar, I. Auer, M. Brunet, T.C. Peterson et J. Wieringa), Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat, N° 53, OMM /TD–N° 1186, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003b : *Manuel du système mondial d'observation*, OMM –N° 544, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2006 : *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (T.R. Oke), Rapport N° 81 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM /TD–N° 1250, Genève.
- Peterson, T.C., 2003 : Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found, *Journal of Climate*, vol. 16, p. 2941–2959.
- Rotach, M.W., 1999 : On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion, *Atmospheric Environment*, vol. 33, p. 4001–4008.
- Schmid, H.P., 2002 : Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, N° 1, p. 159–183.
- Schmid, H.P., H.A. Cleugh, C.S.B. Grimmond et T.R. Oke, 1991 : Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 54, N° 3, p. 249–276.
- Soux, A., J.A. Voogt et T.R. Oke, 2004 : A model to calculate what a remote sensor 'sees' of an urban surface. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 111, p. 109–132.
- Stull, R.B., 1988 : *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Verkaik, J.W., 2000 : Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 39, N° 9, p. 1613–1626.
- Voogt, J.A. et T.R. Oke, 2003 : Thermal remote sensing of urban climates, *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, N° 3, p. 370–384.
- Wieringa, J., 1986 : Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 112, N° 473, p. 867–889.
- Wieringa, J., 1993 : Representative roughness parameters for homogeneous terrain, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 63, N° 4, p. 323–363.
- Wieringa, J., 1996 : Does representative wind information exist ? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 65, N° 1, p. 1–12.

CHAPITRE 12

MESURES DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRE

12.1 GÉNÉRALITÉS

12.1.1 Définition

Les mesures de météorologie routière présentent un intérêt particulier dans les pays où la viabilité hivernale des infrastructures de transport a une incidence importante sur l'économie nationale. Par ailleurs, certains pays sont exposés à des risques routiers d'un autre type, liés par exemple aux tempêtes de poussière ou aux éruptions volcaniques. Certaines conditions peuvent avoir un impact négatif sur la sécurité et l'efficacité du transport routier et avoir une incidence sur la vitesse, les distances de sécurité, l'adhérence des pneumatiques et l'efficacité du freinage, à savoir: mauvaise visibilité (fortes précipitations, brouillard, fumée, tempête de sable), vents violents, inondations de la chaussée, affaissement du sol, neige, précipitations verglaçantes et glace.

12.1.2 Objectif

Les gestionnaires de réseaux routiers ont pour mission de garantir des conditions de circulation optimales, fluides et sûres sur les différents axes routiers. Les décisions opérationnelles relatives à la diffusion d'informations météorologiques routières et aux opérations de déneigement et de lutte contre le verglas dépendent des observations de météorologie routière de plus en plus souvent réalisées par des stations automatiques spécialisées. Ces stations doivent, dans la mesure du possible, respecter les normes d'exposition des capteurs et de mesures en vigueur pour des stations automatiques classiques (voir chapitre 1 de la présente Partie). Pourtant elles possèdent des caractéristiques spécifiques en termes d'exigences de fonctionnement, d'implantation et de mesures.

La fiabilité de ce type de stations, destinées à fournir des données à un système d'aide à la décision dans le domaine des transports, constitue un élément crucial : Chaque station sera chargée d'observer l'environnement immédiat de grands itinéraires à forte densité de circulation, pourra alimenter en données les programmes de prévision de météorologie routière et générer des alarmes automatiques. Ainsi, la fiabilité et l'entretien des équipements, l'alimentation électrique, la continuité des communications et l'intégrité des données, constituent tous des facteurs importants à prendre en compte lors de la sélection, du déploiement et de l'exploitation d'un réseau de

mesures météorologiques. Ceci permet de souligner les avantages d'une collaboration efficace entre les gestionnaires des réseaux routiers et le Service météorologique et hydrologique national (SMHN).

12.1.3 Besoins en matière de météorologie routière

Le présent chapitre propose une méthode de normalisation des mesures de météorologie routière conforme dans toute la mesure possible aux normes habituelles de l'OMM. Toutefois, il convient de prévenir les utilisateurs souhaitant utiliser les mesures sur route pour d'autres applications météorologiques qu'il existe des différences importantes, par exemple en termes d'exposition des capteurs.

Les besoins des gestionnaires des réseaux routiers tournent autour de quatre grands domaines (Rapports de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation : N° 61 intitulé *Road Meteorological Observations* et N° 77 intitulé *Road Managers and Meteorologists over Road Meteorological Observations: The Result of Questionnaires*) :

- a) *Observation de météorologie routière en temps réel* : d'une part, l'objectif concret est d'informer les usagers de la route des risques (prévus ou réels) auxquels ils sont susceptibles d'être confrontés sur certains itinéraires, et d'autre part, de lancer une série d'interventions visant à améliorer la sécurité routière, par exemple le déneigement ou le traitement aux fondants ;
- b) *Amélioration des prévisions de température du revêtement* : les mesures réalisées par les stations automatiques constituent des données importantes destinées à alimenter les programmes de prévision de la température et de l'état des chaussées susceptibles d'être exploités par le Système météorologique et hydrologique national. Cet organisme a la faculté d'assurer la continuité et la rapidité de transmission des données d'observation et de prévision. Dans la pratique, les prévisionnistes disposent de deux outils. Le premier est un modèle de calcul permettant de transposer une prévision météorologique des conditions atmosphériques en une prévision de température du revêtement, en prenant en compte les caractéristiques physiques de chaque station. Le second consiste à mettre en œuvre un algorithme basé sur une étude climatologique spécifique du revêtement ;

- c) *Base de données climatologiques routières* : il est important d'établir une base de données climatologiques routières car, dans nombre de situations, une évaluation des événements en cours sur un site correctement instrumenté permet aux gestionnaires des réseaux routiers ayant une certaine expérience de transposer les données obtenues à l'aide du modèle climatique à d'autres sites connus. Dans certains cas, il convient de prendre les empreintes thermiques pour pouvoir modéliser cette relation spatiale. L'enregistrement des données météorologiques routières permettra d'analyser les perturbations hivernales antérieures et réaliser des études climatologiques spécialisées dans le domaine routier. Les Services météorologiques et hydrologiques nationaux peuvent comble les lacunes en matière de données, effectuer des comparaisons et assurer un contrôle qualité des mesures issues de différentes sources ;
- d) *Fiabilité des données* : les gestionnaires des routes n'ont pas besoin de données excessivement précises (à l'exception de la température du revêtement). Ils ont juste besoin de disposer des données les plus fiables possible. Ce qui signifie que les données doivent être le reflet d'une situation réelle et que les instruments de mesure doivent être robustes. La continuité des communications et de l'alimentation électrique sont souvent de la plus haute importance.

12.2 IMPLANTATION D'UNE STATION DE MÉTÉORLOGIE ROUTIÈRE

12.2.1 Mesures normalisées représentatives

Les conditions générales de conception et d'implantation des stations météorologiques, ainsi que le type et la fréquence des mesures sont définis dans le *Règlement technique* et le Rapport N° 77 «*Road managers and meteorologists over road meteorological observations*» de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation de l'OMM. Il est recommandé de respecter scrupuleusement les normes et autres prescriptions figurant dans le présent Guide lors de la création d'une station de météorologie routière afin de pouvoir réaliser des mesures représentatives normalisées. En effet, les données enregistrées doivent pouvoir être comparées à celles relevées par les autres stations du réseau et les stations synoptiques ou climatologiques classiques, sauf si les mesures particulières de météorologie routière exigent l'application d'autres normes, par exemple en matière d'exposition des capteurs. Vous pourrez

consulter l'antenne locale du Service météorologique et hydrologique national pour connaître les conditions optimales d'installation des stations et leur densité, laquelle peut avoir accès aux données climatologiques de la région.

Le site d'une station météorologique est sélectionné de manière à correctement représenter une région géographique particulière. L'implantation d'une station de météorologie routière devra donc être représentative du réseau routier ou d'un tronçon de route important réputé dangereux pour des raisons météorologiques ou autres. La station doit donc être installée en bordure de route afin de pouvoir installer des capteurs au niveau du revêtement et ainsi tendre vers un compromis d'implantation et d'exposition «idéales». Ces derniers sont exposés de manière à assurer la meilleure représentation possible dans l'espace et le temps de la variable à mesurer, sans risque important d'interférence avec d'autres paramètres secondaires. En général, le site immédiatement adjacent à la chaussée devra être aplani, recouvert d'une herbe courte et éloigné d'une zone d'ombrage lié à la présence de bâtiments ou d'arbres.

12.2.2 Métadonnées relatives aux stations

Dans tous les cas, il est important de consigner toutes les données relatives à l'emplacement et aux caractéristiques du site, au descriptif du matériel et des capteurs utilisés, notamment les plans et les photographies du site. Ces métadonnées (partie I, chapitre 1 et partie III, chapitre 1) constituent des informations précieuses dans le cadre d'une bonne gestion de la station, lesquelles permettent de comparer les mesures enregistrées avec celles des autres sites.

12.3 VARIABLES OBSERVÉES

12.3.1 Mesures de météorologie routière

Les mesures considérées comme importantes dans le cadre de prévisions relatives à l'état des routes réalisées par les stations de météorologie routière sont les suivantes: température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent, quantité et type de précipitations, visibilité, rayonnement global et de grandes longueurs d'onde, température et état du revêtement. Certains de ces paramètres, tels que la température et l'humidité, entrent dans les prévisions destinées aux usagers de la route, d'autres (vent et visibilité) peuvent indiquer les risques en cours ou à venir; d'autres encore (types de rayonnement, température et état du revêtement) servent uniquement à prévoir le comportement de la chaussée.

Le choix des capteurs est déterminé par des critères d'exactitude, de stabilité, de facilité d'entretien et d'étalonnage, lesquels capteurs devront en outre être dotés de sorties électriques adaptées pour être connectées au système d'acquisition automatique des données. La sélection et l'exposition des capteurs doivent satisfaire aux recommandations et bonnes pratiques standards préconisées par l'OMM (voir les chapitres correspondants de la partie I du présent Guide), à l'exception des points incompatibles avec les exigences particulières de météorologie routière. L'exactitude des mesures devra généralement respecter les valeurs indiquées dans la partie I, chapitre 1, annexe 1B. Reportez vous également aux recommandations portant sur les mesures dans les stations météorologiques automatiques au chapitre 1 de la présente partie.

12.3.1.1 Température de l'air

On peut utiliser un thermomètre à résistance électrique (platine ou thermistance stable). Le capteur de température de l'air, sa protection contre les rayonnements et son exposition doivent répondre aux directives de la partie I, chapitre 2, l'abri étant monté à une hauteur comprise entre 1,25 et 2 m au-dessus d'un sol naturel ou recouvert d'une herbe courte.

- *Points à prendre en compte* : le capteur et l'écran ne doivent pas être installés au-dessus d'une surface bétonnée ou asphaltée au risque sinon d'obtenir une valeur excessive de la température mesurée. Il faudra en outre veiller à ce que l'écran ne soit pas exposé aux projections d'eau produites par les roues des véhicules susceptibles de provoquer d'importantes erreurs de détection.

12.3.1.2 Humidité relative

Le capteur hygrométrique peut être de type conducteur électrique ou capacitif à couche mince (partie I, chapitre 4). Il n'est pas recommandé de faire appel à un psychromètre à bulbe humide en raison d'une contamination permanente de la mèche par les hydrocarbures. Le capteur peut être associé à un capteur de température de l'air ou placé à côté de ce dernier à l'intérieur de l'écran de protection contre les rayonnements à condition que la sortie thermique du capteur (échauffement spontané) soit placée très bas de sorte à ne pas influer sur les mesures de température.

- *Points à prendre en compte* : même risque de projections d'eau que pour le capteur de température. Les performances du capteur d'humidité sont affectées par la contamination liée à la pollution atmosphérique et automobile. Il conviendra de réaliser des contrôles fonctionnels à intervalles réguliers dans le cadre du contrôle qualité de l'acquisition de données, et de vérifier l'étalonnage de ces derniers au

moins tous les six mois, en particulier avant l'hiver. Un capteur qui ne répond pas correctement doit être immédiatement remplacé.

12.3.1.3 Vitesse et direction du vent

On mesure généralement ce type de variables à l'aide soit d'un anémomètre à coupes associé à un anémomètre girouette, soit d'un anémomètre à hélice (partie I, chapitre 5) produisant des impulsions ou une fréquence. Les capteurs doivent être installés à la hauteur standard de 10 m au-dessus du sol dans une zone dégagée représentative pour éviter que les mesures ne soient influencées par des perturbations de la masse d'air circulant en raison du trafic et des obstacles locaux.

- *Points à prendre en compte* : le grippage des pièces mobiles, les infiltrations d'eau, la corrosion et la foudre constituent des risques potentiels.

12.3.1.4 Précipitations

- Précipitations cumulées* : le pluviomètre à augets basculants (partie I, chapitre 6), généralement utilisé dans les stations automatiques, mesure la quantité de précipitations cumulées par pas de 0,2 mm. On peut faire appel à des pluviomètres chauffés pour mesurer la quantité de neige ou autres précipitations solides. Le taux de précipitations peut s'évaluer en enregistrant le nombre de basculements effectués par les augets sur un intervalle de temps donné.

- *Points à prendre en compte* : le pluviomètre doit être placé de niveau, l'entonnoir et les augets devant être propres et exempts de toute obstruction. Ce type d'instrument n'est pas adapté pour indiquer le début d'une pluie de très faible intensité, ou sur de longues périodes de gel. Les totaux enregistrés seront inférieurs aux valeurs réelles en raison des effets du vent autour de l'orifice de l'entonnoir, de l'évaporation au niveau des augets entre les averses ou des pertes entre les basculements des augets par fortes pluies.

- Fréquence et type de précipitations* : il existe des capteurs dotés de moyens électroniques (notamment grilles chauffées, mesure de capacité et de conductance) destinés à estimer le type de précipitation (bruine, pluie ou neige) reçue. Les capteurs optiques capables de déterminer les caractéristiques d'une précipitation (taille, densité et mouvement des particules) par diffusion d'un rayon laser à semi-conducteur offrent une meilleure mobilité à un coût infinitement plus élevé.

- *Points à prendre en compte* : on a véritablement besoin de ce type de détection dans toutes les stations, mais les modèles actuels de capteurs

souffrent d'un manque de mobilité et de reproductibilité stable. Des dispositions devront être prises (cycles de chauffage) pour éliminer la neige accumulée à la surface des capteurs. Un nettoyage régulier des éléments sensibles et des surfaces optiques s'impose. Seuls les capteurs accompagnés d'une documentation détaillée et susceptibles d'être étalonnés à partir d'un étalon de référence pourront être installés. Si le système fait appel à un algorithme pour dériver une variable de manière indirecte, l'algorithme devra aussi être accompagné d'un document explicatif.

12.3.1.5 **Grandeurs météorologiques du rayonnement**

- a) *Rayonnement global* : il convient de mesurer le rayonnement solaire (direct et diffus) reçu par une surface horizontale à partir d'un angle solide de 2π sr à l'aide d'un pyranomètre doté d'un élément sensible thermoélectrique ou photoélectrique (partie I, chapitre 7). Le capteur doit être positionné de manière à ce qu'aucun obstacle important à proximité au-dessus du plan de l'instrument ne vienne projeter une ombre ou réfléchir la lumière sur le capteur. Il faut en outre éviter tout risque de dommage accidentel, le capteur devant néanmoins demeurer accessible à des fins d'inspection et d'entretien. Le rayonnement global mesuré «sur site» est un paramètre particulièrement important pour le gestionnaire des routes. Il exprime la quantité d'énergie reçue par la chaussée pendant la journée. La relation rayonnement incident /température de surface et inertie de la chaussée est fonction des matériaux qui la composent et de sa masse.
• *Points à prendre en compte* : horizon du capteur obstrué, capteur qui n'est pas de niveau, surface sale, neige ou givre obscurcissant la coupelle en verre ou la surface sensible, condensation à l'intérieur de la coupelle en verre ;
- b) *Rayonnement de grandes longueurs d'onde* : on peut utiliser un pyrégomètre pour mesurer le rayonnement dans l'infrarouge à l'aide d'une thermopile filtrant le spectre visible. Capteur pointé vers le haut avec un horizon suffisamment dégagé, cet instrument permet de mesurer le rayonnement de grandes longueurs d'onde reçu de l'atmosphère, en particulier la nuit, et donne une indication sur la couverture nuageuse et donc sur le refroidissement radiatif de la chaussée. Un capteur sensible à un spectre compris entre 5 à 50 μm , avec une sensibilité maximale de 15 $\mu\text{V/Wm}^{-2}$ et un temps de réponse inférieur à 5 s est tout à fait adapté aux prévisions de météorologie routière.

- *Points à prendre en compte* : mêmes commentaires que pour le rayonnement global.

12.3.1.6 **Visibilité**

On peut utiliser des transmissomètres et des diffusiomètres à transmission frontale (partie I, chapitre 9).

- *Points à prendre en compte* : les gestionnaires des routes s'intéressent à une visibilité inférieure à 200 m (seuil de danger). Il est important de maintenir propres les fenêtres et les hublots des capteurs. Certains systèmes prévoient une correction à partir d'un certain degré de contamination de la fenêtre. Une procédure d'étalonnage appropriée devra être mise en place pendant la maintenance de routine.

12.3.1.7 **Température du revêtement**

Il existe capteurs actifs dotés d'une résistance de platine de 100 ohms et destinés à transmettre des signaux numériques en série, lesquels peuvent être enfouis dans le revêtement. Il convient de respecter les consignes d'installation, de câblage et de fixation à la résine des capteurs fournies par les fabricants. Le capteur doit être placé en dehors de la zone de contact avec les pneumatiques afin d'éliminer tout risque de salissure à la surface du capteur et toute erreur de mesure suite à un échauffement dû au frottement. Le capteur doit être déployé dans le même plan que le revêtement en évitant de former un creux dans lequel l'eau risquerait de s'accumuler et ainsi affecter la mesure. La position du capteur doit être régulièrement vérifiée.

- *Points à prendre en compte* : le temps de réponse thermique (constante de temps) du capteur et du matériau enfoui doit correspondre à celui des composants du revêtement. Le fini de surface du capteur doit permettre une faible capacité d'absorption dans l'infrarouge afin de minimiser les erreurs liées au rayonnement. Si vous utilisez des longueurs de câbles supérieures à 20 m, il est recommandé de prévoir une compensation de résistance du câble.

12.3.1.8 **Température de la chaussée**

On mesure la température en noyant des capteurs correctement gainés, dotés d'une résistance électrique, dans la chaussée à 5, 10 et 20 cm de profondeur et en faisant appel à une résine adaptée.

- *Points à prendre en compte* : voir le point consacré à la température du revêtement.

12.3.1.9 **État du revêtement et temps de gel**

Ce capteur sert à évaluer l'état du revêtement (sec, mouillé, givré ou verglacé), et la température de congélation de l'eau résiduelle en surface. Le circuit de commande du capteur réchauffe ce dernier avant

de le refroidir par effet Peltier. La vitesse de refroidissement est fonction de l'état de surface et du temps de gel. Reportez vous également à la partie I, chapitre 6, pour plus ample information sur les chaussées verglacées. Le signal de sortie du capteur doit fournir aux gestionnaires des routes une indication sur la rémanence des fondants en un lieu précis et leur permettre d'optimiser les opérations d'épandage.

- *Points à prendre en compte* : le capteur doit être exempt de tout corps étranger et ne pas être recouvert lors des opérations de rechargement de la chaussée. Il doit être nettoyé à intervalles réguliers. Il est difficile d'obtenir une réponse du capteur représentative de l'état réel du revêtement en raison de la faible taille de l'échantillon, de son positionnement sur la chaussée et des diverses pratiques d'en-châssement. Les mesures dépendent de la densité du trafic et ne sont pas très stables dans le temps. Il est souvent difficile de se procurer ce type de capteur car il n'existe qu'un faible nombre de marques sur le marché. La télédétection de la température du revêtement à l'aide de capteurs thermiques infrarouges n'est souvent pas réalisable en raison des perturbations créées par le jaillissement de l'eau sous les roues des véhicules. On peut perfectionner l'évaluation des risques de gel du revêtement en améliorant les mesures de température, d'humidité et de température de l'air à la surface et à l'intérieur du revêtement, et notamment en améliorant l'exposition des capteurs et en limitant les risques d'erreurs systématiques et aléatoires.

12.3.1.10 Vidéosurveillance

La vidéosurveillance est l'une des composantes de ce qu'il est convenu d'appeler les systèmes de transport intelligents. Ces systèmes sont essentiellement destinés à détecter les incidents routiers, mais aussi à fournir des indications météorologiques utiles aux gestionnaires des transports. Des algorithmes de traitement de l'image permettent d'établir une distinction entre les différentes conditions météorologiques.

12.4 CHOIX DES ÉQUIPEMENTS D'UNE STATION DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRE

Le chapitre 1 de la présente partie fournit des informations susceptibles d'être mises en œuvre dans les applications de mesures de météorologie routière. Les paragraphes suivants mettent l'accent sur les problèmes spécifiques soulevés par les gestionnaires de réseaux routiers à partir de leur expérience, et en particulier sur la nécessité d'obtenir des prévisions de grande qualité dès lors que la sécurité publique est en jeu.

12.4.1 Environnement routier

Une station de météorologie routière est soumise à de fortes contraintes liées à la proximité de la chaussée : vibration, perturbations liées au système d'allumage des véhicules, pollution due aux gaz d'échappement, corrosion provoquée par les opérations de salage, et actes de malveillance. À certains égards, on peut estimer que la station fonctionne dans un environnement industriel, avec tout ce que cela implique en termes de robustesse de conception et d'intégrité des données. Les problèmes fréquemment rencontrés sont les suivants : absence de protection contre les surtensions sur les circuits d'interface avec les capteurs, mauvais isolement électrique entre les capteurs, les câbles de ces derniers et l'unité d'acquisition des données, variation de la résistance de contact du connecteur entraînant une dérive de l'instrument par rapport à l'étalonnage, échec de la mesure et besoin accru de maintenance.

12.4.2 Capacité de traitement d'une station déportée

On constate une évolution dans la conception des stations météorologiques automatiques en faveur d'une augmentation des capacités de traitement et de stockage des données au niveau de l'unité déportée. Une telle évolution permet de mettre en œuvre des algorithmes capables de traiter plusieurs signaux transmis par les capteurs et ainsi d'obtenir des valeurs de sorties complexes. Ce système permet en outre de garantir un certain niveau de qualité des données, d'assurer une communication bidirectionnelle entre l'unité centrale de commande et les unités déportées à des fins de diagnostic portant à la fois sur les performances des capteurs et celles des unités. Il offre également la possibilité pour les unités déportées de télécharger de nouveaux algorithmes et des mises à jour logicielles. Mais la mise en place d'un réseau de stations déportées moins complexes, se limitant à une acquisition fiable des données, connectées à une unité centrale de commande et d'acquisition des données chargée de mettre en œuvre des algorithmes plus complexes, de contrôler la qualité des données, de gérer la conversion des codes, et de traiter les données de plus haut niveau à destination des gestionnaires des routes, peut s'avérer plus fiable et moins coûteuse. Si vous souhaitez mettre en place un réseau de mesures de météorologie routière, nous vous encourageons à envisager des solutions souples et évolutives et à prévoir des options de programmation puissantes pour le traitement des données fournies par les capteurs et l'unité de commande du système.

Le traitement des données enregistrées par la station peut notamment couvrir les opérations suivantes :

commande du cycle de mesures (lancement, fréquence, heure et date) ; gestion complexe des capteurs (mise sous/hors tension, mode d'échantillonnage) ; traitement des signaux du capteur (filtrage, conversion en unités scientifiques, algorithmes) ; contrôle de la qualité des données ; génération d'alarmes (variables en dehors des limites prédéfinies, défaillance partielle du système, perte d'intégrité de la station) ; stockage des données (à court terme et archivage) ; génération de messages de sortie (forme symbolique des codes, protocole de communications) ; gestion des communications et maintenance de la station (alimentation électrique, vérification des capteurs, communications).

12.4.3 Configuration du réseau et options d'équipement

Le choix de l'équipement de la station, du système de communication et de commande du réseau (infrastructure du réseau) doit correspondre aux besoins des gestionnaires des réseaux routiers en matière de météorologie routière afin d'aider ces derniers à prendre les bonnes décisions. Il dépendra dans une large mesure des relations entre la direction des routes et le Service météorologique et hydrologique national. Par exemple, la direction des routes pourrait signer un contrat avec le SMHN portant sur des services de prévision météorologique routière et la fourniture de données particulières auxquelles les gestionnaires du réseau routier pourraient appliquer leurs propres critères physiques avant de prendre des décisions opérationnelles. Dans ces conditions, il serait logique que les stations du réseau routier constituent une extension du réseau de stations météorologiques automatiques du SMHN, partageant ainsi le matériel, le système de communication et le service de maintenance, avec une attention toute particulière portée à la fiabilité du réseau. Des capteurs, des algorithmes et des logiciels spécialement adaptés aux applications météorologiques sont déployés. Toutefois, si une telle intégration s'avérait impossible, la direction des routes pourrait envisager d'adopter certains éléments communs aux systèmes du SMHN afin de tirer profit de l'expérience opérationnelle de ce dernier et des possibilités d'approvisionnement en matériel et pièces détachées.

Si vous devez mettre en place un réseau distinct ou totalement nouveau, nous vous recommandons de suivre les consignes suivantes pour sélectionner le matériel d'acquisition des données et le système de communications. Plutôt que de mettre au point des logiciels et un matériel nouveaux pour réaliser des mesures de météorologie routière, il serait plus judicieux de faire appel à des systèmes existants, commercialisés par des fabricants et des distributeurs réputés et qui ont déjà fait leurs preuves, et de les

adapter aux applications routières. Il conviendrait en outre de s'appuyer sur l'expérience et les conseils des autres gestionnaires de réseaux routiers. Le matériel et les logiciels associés devront être de type modulaire afin de pouvoir rajouter ultérieurement des capteurs et tenir compte des éventuelles modifications techniques apportées aux capteurs. Et pour faciliter toute extension du réseau au bout de quelques années, il peut s'avérer intéressant de choisir un matériel normalisé et de s'approvisionner auprès d'un fabricant sérieux, capable de garantir une compatibilité technique avec les versions antérieures.

12.4.4 Conception : garantir la fiabilité

Les modules de traitement des données devront satisfaire à la norme ISA (architecture standard du marché) et être dotés d'un système d'exploitation standard robuste avec une bonne gestion du processus de mise à niveau. Les logiciels d'application devront être écrits dans un langage standard et accompagnés de la documentation correspondante. Afin d'obtenir la fiabilité requise, on pourra sélectionner des composants et des modules fabriqués spécialement. Une alternative moins onéreuse consisterait à adopter du matériel standard du commerce doté de systèmes redondants ou de secours pour garantir la fiabilité du système. Il conviendra de porter une attention particulière à la conception de l'alimentation électrique de l'unité déportée. Il est recommandé de prévoir une alimentation sans coupure, mais il faut bien admettre que les systèmes de communication sont également tributaires du bon fonctionnement du réseau électrique local.

Quelle que soit la conception du système adoptée, le fait de placer l'électronique dans un coffret solide, anticorrosion, sûr, avec une température interne constante, exempt de tout risque d'exposition à l'humidité et à la poussière, constitue un plus en termes de fiabilité. Les connecteurs de sortie des capteurs devront être de haute qualité industrielle ou militaire et correctement protégés contre la déformation des câbles, les infiltrations d'eau et la corrosion. Les câbles des capteurs devront être dotés d'un blindage avec mise à la terre et d'une gaine isolante étanche, et placés dans un tube.

Il faudra en particulier s'efforcer d'éviter les effets liés au bruit électrique ou aux perturbations introduites dans le système d'acquisition des données via les câbles des capteurs, les lignes d'alimentation électrique ou de communication. Ces signaux parasites peuvent engendrer des erreurs de signaux de mesure transmis par les capteurs. Ceux-ci peuvent donc entraîner une corruption des données et une défaillance de l'électronique, en particulier au niveau des circuits d'interface sensibles. Une grande attention

devra être portée aux points suivants : conception de l'isolement du capteur et de la ligne de communication, protection contre les surtensions, notamment protection adaptée contre l'électricité atmosphérique, mise à la terre ou au neutre appropriée des capteurs, de l'alimentation électrique, des modems de communication et des armoires, et blindage de toutes les pièces de la chaîne de mesure relié à la terre, en évitant les boucles de masse susceptibles de provoquer des erreurs de mesure.

L'adoption de pratiques normalisées d'installation et de maintenance permet d'augmenter significativement la fiabilité du système, laquelle est, entre autres, fonction du temps moyen de réparation : temps de traitement de la demande, durée de déplacement et d'intervention d'un technicien pour remplacer le matériel défectueux en faisant appel aux modules ou unités complètes en stock.

12.5 CHIFFREMENT DES MESSAGES

12.5.1 Fonctions

Le message transmis par une station déportée de météorologie routière comporte le numéro d'identification de la station, la date et l'heure du message, les données relatives à la voie du capteur, notamment l'identification de la voie, et certaines données de maintenance pouvant inclure des informations sur la sécurité, l'alimentation, l'étalonnage de la station et autres vérifications de la qualité des données. Ce message est contenu dans l'enveloppe du code se rapportant à la voie de communication avec un en-tête comportant l'adresse, les caractères relatifs aux informations de commande et à la vérification des redondances afin de faciliter la détection d'erreurs. La partie relative aux données de météorologie routière du message peut être chiffrée par tout moyen clair et efficace permettant à l'ordinateur central de commander et d'acquisition des données de décoder et de traiter les données avant de transmettre des informations intelligibles aux gestionnaires des réseaux, lesquelles leur permettront de prendre les décisions appropriées.

12.5.2 Procédures normalisées de chiffrement de l'OMM

Les concepteurs de réseaux de mesures de météorologie routière doivent également prendre en compte les avantages que représente le système de chiffrement normalisé des messages mis au point par l'OMM (Manuel des codes de l'OMM), lequel permet aux autres utilisateurs tels que les SMHN de recevoir des données sous une certaine forme et les mettre en

œuvre dans d'autres applications météorologiques. Le chiffrement des messages peut être réalisé par la station automatique déportée qui envoie les demandes au logiciel et à l'unité de traitement de la station, ou les envoie, ce qui est plus probable, à l'ordinateur central de commande et d'acquisition des données une fois réalisées les opérations de contrôle qualité de ces dernières.

12.6 ORDINATEUR CENTRAL DE COMMANDE ET D'ACQUISITION DES DONNÉES

Les fonctions de l'ordinateur central (ou des ordinateurs) ont déjà été évoquées : gérer le réseau en contrôlant les communications (voir ci-dessous), recevoir des rapports (messages de météorologie routière, messages de maintenance des stations automatiques et informations relatives à la qualité), traiter les données de mesures routières destinées à fournir aux gestionnaires des réseaux routiers les informations opérationnelles et les outils d'aide à la décision dont ils ont besoin. L'architecture du réseau pourra être conçue de manière à ce que l'ordinateur central puisse servir d'Intranet ou de serveur Web afin que les gestionnaires régionaux et autres utilisateurs de données météorologiques puissent accéder rapidement à ces informations.

Il faudra probablement prévoir un ordinateur spécialement consacré à la gestion de la base de données climatologiques du réseau routier, ainsi qu'à la production et la diffusion d'analyses et de résumés statistiques. Si le réseau est particulièrement perfectionné, l'ordinateur central pourra en outre gérer certaines opérations d'entretien et d'étalonnage, modifier les modes d'exploitation et mettre à jour les logiciels des stations automatiques.

12.7 COMMUNICATIONS

Il est indispensable de pouvoir disposer d'un service de télécommunications fiable en vue de garantir une gestion efficace du réseau de stations, capable de fournir toutes les données voulues en temps et en heure. Étant donné que la plus grande part des coûts annuels d'exploitation encourus seront liés aux frais de communications, il est important de bien étudier les différentes options afin d'optimiser le coût par message en fonction du niveau de service requis. L'analyse détaillée des différentes solutions de télécommunications en termes de collecte des données et de gestion des stations automatiques de météorologie routière n'entre pas dans le cadre du présent

chapitre (voir le chapitre 1 de la présente partie pour plus ample information sur la transmission des données). Le choix du système de communication dépendra des objectifs de gestion du réseau de mesures de météorologie routière et des services offerts par les prestataires de services de télécommunications du pays et des tarifs pratiqués.

12.8 TRAITEMENT DES SIGNAUX ÉMIS PAR LES CAPTEURS ET GÉNÉRATION D'ALARME

12.8.1 Algorithmes de traitement des signaux

Les signaux de données brutes émis par les capteurs doivent être traités ou filtrés pour pouvoir obtenir des valeurs moyennes représentatives. Cette opération peut s'effectuer soit au niveau de certains capteurs actifs, à l'interface des capteurs avec l'unité d'acquisition des données, soit dans l'unité de traitement des données de plus haut niveau de la station. L'annexe 1B, partie I, chapitre 1, précise les caractéristiques techniques qui permettront de calculer la valeur moyenne des signaux de sortie des capteurs.

Les algorithmes appliqués aux données de sortie des capteurs (ou groupes de signaux de sortie) soit au niveau de la station déportée, soit au niveau de l'ordinateur central, devront émaner de sources fiables, avoir été soigneusement testés et avoir de préférence fait l'objet de publications accessibles à tous. Les algorithmes développés en interne et adoptés par le gestionnaire d'un réseau routier devront être correctement définis et enregistrés dans les métadonnées de la station ou les manuels du réseau.

12.8.2 Génération d'alarmes

Des indications d'alarme peuvent être générées à partir des signaux de sortie des capteurs lorsque les valeurs excèdent les limites prédéfinies et sont envoyées à la station automatique qui lance alors des messages d'alarme. Le choix des alarmes et des tests aux limites est fonction des pratiques nationales ou régionales. Nous présentons ci-après quelques exemples d'alarmes transmises par une station automatique. Notez l'emploi des combinaisons logiques «ET» et «OU» dans les algorithmes :

Exemples d'alarmes :

Alarme 1 :

T (air) OU T (revêtement) 3 °C

ET

T (revêtement extrapolée)^a ≤ 1 °C

Alarme 2 :

T (air) ≤ 0° C

Alarme 3, situation 1 :

T (revêtement) ≤ 1 °C

OU T (revêtement extrapolée) ≤ 0 °C

OU T (chaussée à - 5 cm) ≤ 0 °C

OU T (chaussée à - 10 cm) ≤ -1 °C

OU T (chaussée à - 20 cm) ≤ -2 °C

ET situation 2 :

La chaussée n'est pas sèche

OU au moins une précipitation mesurée dans l'heure précédente

OU humidité relative ≥ 95 %

OU T (revêtement) - T (point de rosée) ≤ 1 °C

Alarme 4 :

T (revêtement) ≤ 0 °C

ET état détecté : gel ou verglas

Alarme 5, situation 1 :

Précipitation détectée = neige ou grêlons

ET situation 2 :

T (air) ≤ 2 °C

OU T (revêtement) ≤ 0 °C

Alarme 6 :

Vitesse moyenne du vent ≥ 11 m s⁻¹

ET

Direction du vent par rapport à l'azimut de la route, entre 45° et 135° OU 225° et 315°

Alarme 7 :

Visibilité ≤ 200 m

^a On extrapole la température du revêtement en appliquant un algorithme qui prend en compte les dernières mesures et crée une équation du deuxième degré. Il sert à estimer la température sur les trois heures suivantes.

On peut définir des alarmes en cas de défauts sur les capteurs, les formats de messages, l'alimentation électrique ou les communications.

12.9 CONTRÔLE QUALITÉ DES MESURES

La qualité des décisions en matière de gestion des routes dépend de la fiabilité des mesures réalisées. C'est pourquoi, lorsqu'un défaut est détecté au niveau des capteurs, de leur câblage ou de l'interface avec la station automatique, l'unité défectueuse doit être identifiée et réparée dans les plus brefs délais. Il est très difficile à un gestionnaire des routes de repérer des valeurs de mesure erronées. Il convient de se reporter aux instructions relatives au contrôle qualité données dans le chapitre 1 de la présente partie, ainsi que dans le chapitre 1 de la partie III. Les dé-

faillances brutes des capteurs peuvent être détectées par le logiciel système de la station automatique qui devra alors générer une situation d'alarme.

12.9.1 Recherche des valeurs parasites

Les mesures situées en dehors de la plage attendue de fonctionnement du capteur, par exemple, 0° à 359° pour une girouette, et un point de rosée supérieur à la température de l'air, peuvent être rejetées en déterminant les limites pour chaque variable. Lorsqu'on enregistre un signal de sortie zéro erroné, une dérive rapide ou un changement de pas dans la réponse d'un capteur, les mesures incorrectes peuvent être rejetées par le logiciel qui réalise l'analyse statistique des mesures dans le temps, soit au niveau de la station automatique si elle est dotée de la puissance de traitement nécessaire, soit au niveau de l'ordinateur central d'acquisition des données. Dans certains des exemples ci-dessous, on compare l'écart type des dernières valeurs de n avec une valeur de seuil paramétrée.

Voici quelques exemples d'algorithmes de vérification (uniquement pour les mesures de météorologie routière) :

- a) Test portant sur toutes les températures : accepter les données uniquement si l'écart type des trente dernières valeurs est égal à $\geq 0,2^\circ\text{C}$;
- b) Test portant sur la vitesse du vent : accepter les données uniquement si l'écart type des vingt dernières valeurs est égal à $\geq 1 \text{ km h}^{-1}$;
- c) Test portant sur la direction du vent : accepter les données uniquement si l'écart type des trente dernières valeurs est égal à $\geq 10^\circ$;
- d) Test portant sur les précipitations liquides : vérifier la cohérence des valeurs relevées par rapport à celles du jour précédent ;
- e) Test portant sur les précipitations de neige : vérifier les données si $T(\text{air}) > 4^\circ\text{C}$;
- f) Test portant sur le rayonnement atmosphérique de grandes longueurs d'onde (RA) (couverture nuageuse) : Refuser les données si $RA > 130 \text{ W m}^{-2}$, si l'humidité relative $> 97\%$ et $RA > 10 \text{ W m}^{-2}$, et si l'humidité relative $\geq 90\%$ et $RA > 10 \text{ W m}^{-2}$, pendant quatre heures consécutives.

12.10 MAINTENANCE DES STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRE

12.10.1 Environnement routier

Il convient de se reporter aux différentes sections des chapitre 1 de la partie I et chapitre 1 de la présente partie portant sur l'inspection, l'entretien et l'étalonnage. Les chapitres de la partie I comportent des

conseils sur l'entretien et l'étalonnage de capteurs particuliers. Notez toutefois que les stations automatiques de météorologie routière fonctionnent dans un environnement connaissant des problèmes spécifiques: vulnérabilité de la station automatique et des capteurs aux dommages intentionnels ou accidentels; exposition à une pollution importante liée aux gaz d'échappement; perturbation électrique due au système d'allumage des véhicules et aux lignes haute tension situées à proximité ; corrosion dû au sel épandu et vibrations (affectant les connexions entre les capteurs et les câbles).

12.10.2 Plans de maintenance et documentation

Les décisions opérationnelles touchant à la sécurité routière dépendent essentiellement de la fiabilité des données transmises par les stations météorologiques automatiques et c'est pourquoi la maintenance des stations concernées à des périodes bien précises de l'année fait l'objet d'exigences très rigoureuses. Ces éléments sont traités dans le plan de gestion de la maintenance du réseau, lequel doit notamment détailler le programme de maintenance préventive et préciser les mesures correctives à prendre pour les cas de défaillance connus.

Les gestionnaires des réseaux routiers devront élaborer leur propre manuel de maintenance des stations de météorologie routière dont ils ont la charge en se fondant sur les recommandations fournies par les fabricants, les informations données dans le présent Guide ainsi que sur leur expérience personnelle. Tout bon manuel doit contenir les listes de contrôle destinées à faciliter les opérations d'inspection et de maintenance. Un gestionnaire peut décider de sous-traiter les travaux d'inspection et de maintenance au SMHN local, lequel devra bien connaître le type d'instrumentation utilisée.

12.10.3 Inspections et programmes de travail

Chaque station devra être soumise à un programme complet de maintenance deux fois par an : entretien du site (coupe de l'herbe et de la végétation susceptibles d'affecter l'exposition des capteurs) ; vérification des coffrets à la recherche d'éventuelles infiltrations d'eau et remplacement des déshydratants ; traitement et peinture des coffrets, écrans et supports détériorés par les intempéries et la corrosion ; vérification de l'intégrité des câbles et des connecteurs ; nettoyage et mise à niveau des capteurs (tenir compte des problèmes de mesures évoqués plus haut) ; et étalonnage ou remplacement des capteurs et de la chaîne de mesures de la station météorologique automatique.

Les gestionnaires des routes devront mettre en place un programme d'inspection matérielle destiné à contrôler l'intégrité et le bon fonctionnement des stations dont ils ont la charge une fois par mois en hiver, et tous les deux mois en été. En cas de travaux au niveau du revêtement, les ouvriers devront installer les panneaux d'avertissement réglementaires et porter des vêtements de sécurité homologués.

12.11 FORMATION

La gestion, l'exploitation et l'entretien d'un réseau de stations de météorologie routière exigent l'intervention d'un personnel qualifié, capable de gérer un

flux continu de données fiables et de les interpréter pour fournir des informations véritablement utiles. Cela couvre les domaines d'expertise suivants : environnement routier et prise de décisions opérationnelles pour garantir des conditions de trafic sûres et fluides, acquisition de données par télétransmission ; télécommunications et informatique ; sélection, mise en œuvre et entretien des capteurs et traitement des signaux émis ; interprétation des données météorologiques et autres en conditions d'exploitation. Les gestionnaires des réseaux routiers devront collaborer avec d'autres organismes, en fonction des besoins, en vue tout à la fois d'entretenir leur niveau de connaissances et mettre en place des formations adaptées afin de garantir le bon fonctionnement du réseau de mesures de météorologie routière.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Association mondiale de la route (AIPCR), 2002 : *Actes du onzième Congrès international de la viabilité hivernale, Sapporo, Japon*
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : *Règlement technique*, OMM-N° 49, Genève
- Organisation météorologique mondiale, 1995 : *Manuel des codes*, vol. I.1 et I.2. OMM-N° 306, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1997 : Rapport N° 61 sur les instruments et les méthodes d'observation intitulé *Road Meteorological Observations*, WMO/TD-No. 842. Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003a : Rapport N° 77 sur les instruments et les méthodes d'observation intitulé *Road Managers and Meteorologists over Road Meteorological Observations: The Result of Questionnaires* WMO/TD-No. 1159, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003b : *Manuel du Système mondial d'observation*. OMM-N° 544, Genève

PARTIE III

ASSURANCE DE LA QUALITÉ ET GESTION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

PARTIE III. ASSURANCE DE LA QUALITÉ ET GESTION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
CHAPITRE 1. GESTION DE LA QUALITÉ	III.1-1
1.1 Généralités	III.1-1
1.2 Série ISO 9000, ISO/CEI 17025, ISO/CEI 20000 et cadre de référence de l'OMM pour la gestion de la qualité	III.1-2
1.3 Mise en œuvre de la gestion de la qualité	III.1-6
1.4 Accréditation de laboratoires	III.1-8
1.5 Outils de gestion de la qualité	III.1-9
1.6 Facteurs influant sur la qualité des données	III.1-9
1.7 Assurance de la qualité (contrôle de la qualité)	III.1-12
1.8 Contrôle des performances	III.1-14
1.9 Homogénéité des données et métadonnées	III.1-15
1.10 Gestion de réseaux	III.1-17
Références et autres lectures	III.1-19
CHAPITRE 2. ÉCHANTILLONNAGE DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES	III.2-1
2.1 Généralités	III.2-1
2.2 Séries chronologiques, spectres de puissance et filtres	III.2-3
2.3 Détermination des caractéristiques du système	III.2-11
2.4 Échantillonnage	III.2-12
Références et autres lectures	III.2-16
CHAPITRE 3. RÉDUCTION DES DONNÉES	III.3-1
3.1 Généralités	III.3-1
3.2 Échantillonnage	III.3-3
3.3 Application des fonctions d'étalonnage	III.3-3
3.4 Linéarisation	III.3-3
3.5 Calcul de moyennes	III.3-4
3.6 Variables et statistiques	III.3-5
3.7 Corrections	III.3-5
3.8 Gestion de la qualité	III.3-5
3.9 Collecte des métadonnées	III.3-5
Références et autres lectures	III.3-7
CHAPITRE 4. ESSAIS, ÉTALONNAGE ET COMPARAISONS	III.4-1
4.1 Généralités	III.4-1
4.2 Essais	III.4-2
4.3 Étalonnage	III.4-5
4.4 Comparaisons	III.4-6
Annexe 4.A. Procédures applicables aux comparaisons mondiales et régionales d'instruments organisées par l'OMM	III.4-8
Annexe 4.B. Principes directeurs pour les comparaisons d'instruments organisées par l'OMM	III.4-9
Annexe 4.C. Comptes rendus de comparaisons internationales réalisées sous les auspices de la Commission des Instruments et des Méthodes d'Observation	III.4-14
Références et autres lectures	III.4-16

	<i>Page</i>
CHAPITRE 5. FORMATION DES SPÉCIALISTES DES INSTRUMENTS	III.5-1
5.1 Généralités	III.5-1
5.2 Formation professionnelle en réponse aux besoins de l'exploitation	III.5-2
5.3 Formation professionnelle : quelques principes généraux	III.5-3
5.4 Le processus de formation	III.5-7
5.5 Ressources destinées à la formation	III.5-13
Annexe. Centres régionaux de formation	III.5-18
Références et autres lectures	III.5-20

CHAPITRE 1

GESTION DE LA QUALITÉ

1.1 GÉNÉRALITÉS

Ce chapitre, de portée générale, concerne les systèmes opérationnels d'observation météorologique, quels qu'en soient la taille et le type. L'orientation qu'il donne à propos de la gestion de la qualité s'applique à de grands réseaux de stations d'observation aussi bien qu'à des stations isolées.

• *Gestion de la qualité*

La gestion de la qualité inclut les principes et le cadre méthodologique des opérations et permet de coordonner les activités de gestion et de contrôle d'une organisation en matière de qualité. L'assurance de la qualité et le contrôle de la qualité font partie de tout système pratique de gestion de la qualité. L'assurance de la qualité, qui a pour but de veiller à ce que les exigences en matière de qualité soient respectées, inclut toutes les activités planifiées et systématiques lancées au sein d'un système de gestion de la qualité de façon à ce que ces exigences soient respectées pour un produit ou un service donné. Le contrôle de la qualité, associé aux éléments employés pour que les exigences en matière de qualité soient respectées, inclut l'ensemble des techniques et des activités opérationnelles utilisées dans ce but. Ce chapitre concerne la gestion de la qualité associée au contrôle et à l'assurance de la qualité et à la reconnaissance formelle d'activités de laboratoire, en particulier du point de vue des observations météorologiques du temps et des variables atmosphériques.

Nous présentons ici la série de normes ISO 9000 pour permettre aux intéressés de comprendre cet ensemble lors de la mise en place d'un système de gestion de la qualité dans un Service météorologique et hydrologique national (SMHN). Nous présentons aussi les processus minimaux à mettre en place dans un tel système pour répondre aux conditions de la norme ISO 9001. Nous présentons ensuite la notion de management total de la qualité selon les directives ISO 9004 en soulignant l'opinion des usagers et des parties intéressées. Nous présentons en outre la norme ISO/CEI 17025. Nous soulignons les avantages pour les SMHN et les centres régionaux d'instruments d'une accréditation par le biais de cette norme et nous tons l'exigence d'un processus d'accréditation.

La norme ISO/CEI 20000 concernant la gestion des services informatiques est présentée dans le texte, vu que tous les systèmes d'information intègrent des composantes informatiques.

• *Assurance de la qualité et contrôle de la qualité*

Des données sont de bonne qualité lorsqu'elles satisfont des besoins définis et implicites. D'autres chapitres du présent Guide présentent explicitement ou implicitement des exigences en matière d'exactitude, de résolution et de représentativité s'appliquant aux données météorologiques, principalement pour les applications synoptiques. Il est aussi possible d'énoncer des exigences analogues pour d'autres applications. Quelle que soit l'application, il faut supposer qu'un coût total minimal est aussi une exigence explicite ou implicite. Vouloir gérer la qualité, c'est veiller à ce que les données répondent, au coût le plus bas possible, à des exigences (quant à l'incertitude, la résolution, la continuité, l'homogénéité, la représentativité, le respect des délais, la présentation, etc.) déterminées en fonction de l'application. Toutes les données recueillies sont imparfaites, mais si leur qualité est connue et qu'on puisse en faire la démonstration, elles peuvent être utilisées à bon escient.

Il n'est pas simple de produire des données météorologiques de bonne qualité et cela ne peut se faire sans système de gestion de la qualité. Les meilleurs de ces systèmes fonctionnent en continu et interviennent pour tous les aspects de l'ensemble du système d'observation: de l'organisation du réseau et de la formation professionnelle associée, en passant par les opérations d'installation et le fonctionnement des stations, à la transmission et à l'archivage des données. Ils permettent une rétroaction et un suivi à diverses échelles de temps: des données en temps réel aux analyses annuelles et aux processus de bout en bout. Les ressources qu'exige une bonne gestion de la qualité représentent une partie du coût de fonctionnement d'un système ou d'un réseau d'observation, soit en général quelques points de pourcentage du coût global. Sans cette dépense supplémentaire, les données étant d'une qualité qu'il faut considérer comme inconnue, leur utilité en sera réduite.

Un système efficace de gestion de la qualité permet de gérer les rapports entre les moyens en vue de la collecte de données, la collecte de données proprement dite, l'assurance de la qualité des données et leur diffusion auprès des usagers afin que ceux-ci en reçoivent la quantité voulue. Pour un grand nombre de données météorologiques, il existe divers cycles de production, de collecte et vérification de la qualité depuis le terrain jusqu'à la

distribution finale aux usagers. Il est essentiel que tous ces cycles soient identifiés et que le risque de divergence par rapport à la quantité demandée soit réduit au minimum. Nombre de ces cycles sont liés si étroitement qu'on peut les considérer comme ne constituant qu'un seul cycle. La plupart des problèmes surgissent lorsqu'il existe divers cycles et qu'on les considère comme indépendants les uns des autres.

Lorsqu'on obtient une donnée à partir d'un processus de mesure, elle reste une donnée de ce processus. D'autres processus ultérieurs permettent d'en vérifier la valeur en tant que quantité demandée, d'utiliser cette donnée dans un processus d'ajustement afin d'obtenir la qualité voulue ou de la rejeter. Cependant, aucun de ces processus ultérieurs ne modifie la donnée issue du processus de mesure. Le contrôle de la qualité est le processus visant à vérifier si les processus aboutissant à la diffusion de la donnée sont corrects et à réduire au minimum le risque de refus ou d'ajustement de la donnée résultante.

L'assurance de la qualité inclut un contrôle explicite des facteurs qui influent directement sur les données recueillies et traitées avant d'être diffusées auprès des usagers. Pour les observations et les mesures, elle inclut le matériel, l'exposition, les procédures de mesure, l'entretien, l'inspection, l'étalonnage, la création d'algorithmes, la redondance des mesures, la recherche appliquée et la formation professionnelle. Du point de vue de la transmission de données, l'assurance de la qualité est le processus établi afin que pour des données transmises ultérieurement à une base de données utilisateurs, on établisse des protocoles garantissant que les usagers ne recueilleront que des données acceptables.

Le contrôle de la qualité est, pour les systèmes de gestion de la qualité, la composante la plus connue et celle qui en constitue le minimum incompressible. Ce contrôle, qui se compose de tous les processus mis en place pour susciter la confiance et pour que les données produites aient la qualité voulue, inclut l'examen des données dans les stations et les centres de données en vue de vérifier que celles-ci respectent les objectifs du système de gestion de la qualité et de détecter les erreurs afin que les données soient étiquetées comme non fiables, corrigées ou, dans le cas des erreurs importantes, supprimées. Un système de gestion de la qualité doit comprendre des procédures de réinsertion dans le processus de mesure et de contrôle de la qualité pour éviter la répétition des erreurs. L'assurance de la qualité peut s'appliquer en temps réel aux mesures différencées et peut s'intégrer au processus de contrôle de la

qualité pour le processus suivant du système de gestion de la qualité, mais en général, elle a tendance à opérer en temps non réel.

Le contrôle de la qualité en temps réel a lieu habituellement dans la station et dans les centres d'analyse des données météorologiques. Le contrôle différé de la qualité peut avoir lieu dans des centres d'analyse, quand il s'agit d'établir une base de données affinées ou encore dans des centres climatologiques ou dans des banques de données à des fins d'archivage. Dans tous les cas, il convient d'adresser les résultats du contrôle de la qualité aux responsables des observations afin qu'ils puissent leur donner les suites voulues.

La surveillance de la qualité ou contrôle des performances, élément courant du contrôle de la qualité, a lieu en temps non réel et permet d'examiner les performances du réseau ou du système d'observation pour déceler les tendances et les faiblesses systématiques. Il s'agit d'une activité incombant généralement au service qui administre le réseau ou système, qui peut donc recommander de modifier le matériel ou les méthodes de travail. Cette responsabilité incombe en général à l'administrateur de réseau, éventuellement en collaboration avec d'autres spécialistes.

Les méthodes modernes d'assurance de la qualité privilégient les avantages associés à un système global qui établit des procédures permettant une interaction permanente des diverses parties intervenant dans le système d'observation, y compris la haute direction et d'autres postes, tels que les concepteurs et les instructeurs, considérés autrement comme des éléments accessoires en ce qui concerne la qualité opérationnelle après la collecte de données. Les méthodes de gestion de la qualité et d'assurance de la qualité, recommandées officiellement par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), ainsi que d'autres procédures détaillées utilisées dans les domaines de la fabrication et du commerce s'appliquent aussi aux données météorologiques.

1.2 SÉRIE ISO 9000, ISO/CEI 17025, ISO/CEI 20000 ET CADRE DE RÉFÉRENCE DE L'OMM POUR LA GESTION DE LA QUALITÉ

Ce chapitre présente les normes ISO et les rapports qui existent entre elles.

On peut maîtriser les systèmes de management de la qualité de l'ISO grâce à la certification ou à l'accréditation, ce qui, en général, exige un audit extérieur

du système de gestion de la qualité mis en œuvre. La certification implique que le cadre et les procédures employés par l'organisation sont en place et sont utilisés comme indiqué. L'accréditation implique que le cadre et les procédures employés par l'organisation sont en place, sont utilisés comme indiqué et sont susceptibles de permettre l'obtention du résultat voulu. L'évaluation de la compétence technique est obligatoire pour l'accréditation, mais non pour la certification. La norme ISO 9001 permet à une organisation d'obtenir une certification, alors que l'accréditation au titre de la norme ISO/CEI 17025 est communément exigée pour les laboratoires et les observations régulières.

La série ISO 9000 est conçue pour aider des organisations de tous les types et de toutes les tailles à mettre en œuvre et à exploiter des systèmes de management de la qualité. Cette série de normes présente les principes fondamentaux des systèmes de gestion de la qualité et en définit les conditions (par ex. exigences et satisfaction de la clientèle). Le grand principe de cette série est illustré par la figure 1.1. La norme ISO 9001 indique les exigences d'un système de management de la qualité susceptible d'être certifié conformément à cette norme. La norme ISO 9004 donne des directives en vue de l'amélioration continue du système de management de la qualité en vue d'obtenir un système de management total de la qualité. La norme ISO 19011 donne une orientation pour l'audit du système de management de la qualité. Toutes ces normes sont présentées plus en détail dans les documents pertinents du cadre de référence de l'OMM pour la gestion de la qualité.

1.2.1

ISO 9000 : Systèmes de management de la qualité – Principes fondamentaux et vocabulaire

Les huit principes suivants de gestion de la qualité forment la base implicite du leadership des SMHN de toutes les tailles et de l'amélioration continue de leurs performances :

- Souci de la clientèle ;
- Leadership ;
- Implication des personnes ;
- Approche processus ;
- Management par approche système ;
- Amélioration continue ;
- Approche factuelle pour la prise de décisions ;
- Rapports mutuellement bénéfiques avec les fournisseurs.

Tous ces principes doivent être documentés et mis en pratique de façon à respecter les exigences des normes ISO 9000 et 9001 en vue de l'obtention d'une certification. Le principal principe de ces normes est l'approche processus, qu'on peut définir simplement comme étant les activités faisant appel à des ressources pour transformer les intrants en extrants.

Le système de gestion de la qualité fondé sur les processus est modélisé de façon simple dans la figure 1.2. L'idée de base est que le mécanisme est susceptible de permettre une amélioration continue du système et la satisfaction de la clientèle grâce à la mesure des indices des processus (par ex. calcul de la durée d'un modèle GME, satisfaction de la clientèle, temps de réaction, etc.), à l'évaluation des résultats,

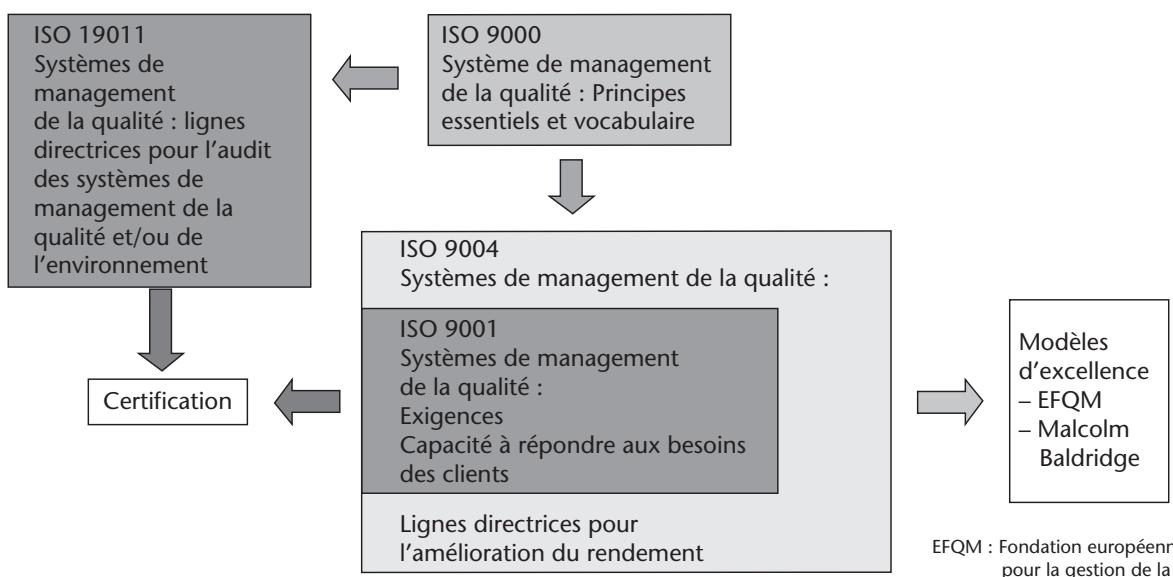


Figure 1.1. Concept de base des normes ISO 9000

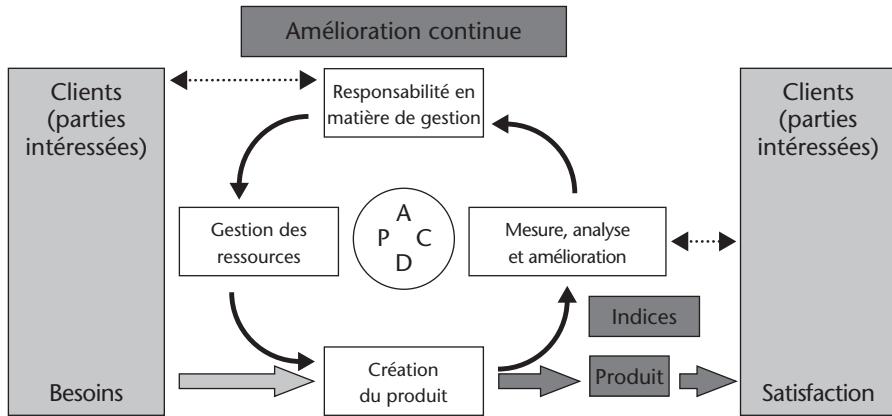


Figure 1.2. Circuit de contrôle PDCA (ou roue de Deming)

à la prise de décisions administratives en vue d'améliorer la gestion des ressources et à l'obtention de produits nécessairement meilleurs.

1.2.2 ISO 9001 : Systèmes de management de la qualité – Exigences

Cette norme indique les exigences de base concernant un système de gestion de la qualité, y compris les processus d'amélioration et de gestion des plaintes et les analyses de la gestion. Normalement, ces processus sont intégrés dans le manuel sur la qualité. La norme ISO 9001 porte sur la responsabilité de l'administration plutôt que sur les activités techniques.

Pour obtenir une certification au titre de la norme ISO 9001, l'organisation (SMHN) doit définir et documenter six processus :

- Contrôle des documents ;
- Contrôle des dossiers ;
- Contrôle des produits non conformes ;
- Mesures correctives ;
- Mesures préventives ;
- Audit interne.

Il doit en outre exister un manuel de la qualité qui indique la politique (par ex., le but est d'obtenir un leadership régional en matière de prévision du temps) et les objectifs de l'organisation (par ex. l'amélioration de la prévision du temps réduit la probabilité d'avertissements erronés) et décrit les cadres des processus et leur interaction. Il doit aussi exister des affirmations concernant :

- La gestion ;
- Les communications internes ;
- L'amélioration continue ;
- Le contrôle du système (par ex. par le biais d'examens de la gestion).

Des exclusions peuvent être prononcées, par exemple en ce qui concerne le développement (si l'organisation ne réalise aucune activité de développement).

La figure 1.3 montre la pyramide de documentation du système de gestion de la qualité. Les descriptions de processus indiquent les activités réelles de l'organisation, par exemple le processus d'acquisition de données dans les réseaux d'observation du temps et du climat. Elles donnent des informations sur les diverses étapes des processus et sur les unités organisationnelles qui réalisent ces étapes, à des fins de coopération et de partage des informations. La documentation doit faire la différence entre processus périodiques et non périodiques. On peut prendre comme exemples de processus périodiques l'acquisition de données et la diffusion de prévisions. On peut prendre comme exemples de processus non périodiques la mise en place d'un matériel de mesure à partir d'une exigence des usagers ou des composantes (par ex. l'ordre d'établir un réseau de mesure).

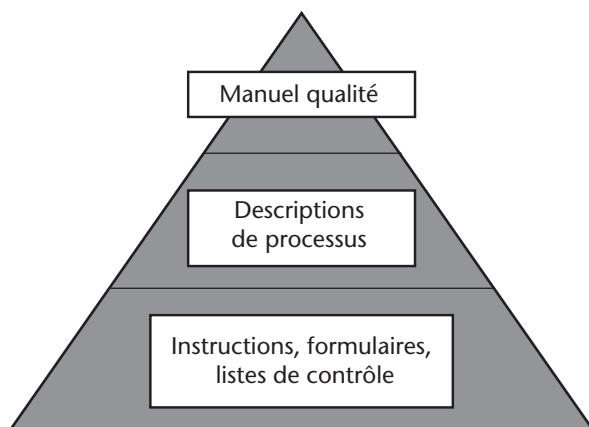


Figure 1.3. Pyramide de documentation d'un système de gestion de la qualité

Enfin, les instructions contenues dans ISO 9001 donnent des informations détaillées sur les étapes des processus à référencer dans la description des processus (par ex. lancement d'une formation sur une station météorologique automatique). Les formulaires et les listes de vérification sont des outils utiles pour réduire le risque d'oubli de tâches à accomplir.

1.2.3 **ISO 9004 : Systèmes de management de la qualité – Lignes directrices pour l'amélioration des performances**

La norme ISO 9004 présente des directives pour le développement du système de gestion de la qualité mis en place afin d'aboutir à l'excellence commerciale. Le principal aspect de la norme est le passage de la position de la clientèle à la position des parties concernées. Divers modèles d'excellence peuvent être élaborés au titre des directives ISO 9004, comme le modèle de la Fondation européenne pour la gestion de la qualité ou le Malcolm Baldrige National Quality Award . Ces deux modèles sont établis et reconnus dans tous les pays du monde.

Le modèle d'excellence de la Fondation européenne pour la gestion de la qualité contient les neuf critères suivants, qui sont évalués par une équipe d'experts :

- a) Leadership ;
- b) Personnes ;
- c) Politique et stratégie ;
- d) Partenariats et ressources ;
- e) Processus ;
- f) Résultats auprès des personnes ;
- g) Résultats auprès de la clientèle ;
- h) Résultats auprès de la société ;
- i) Performances clefs.

Le modèle Malcolm Baldrige contient sept critères semblables à ceux du modèle de la Fondation :

- a) Leadership ;
- b) Planification stratégique ;
- c) Souci de la clientèle et du marché ;
- d) Mesures, analyse et connaissances, gestion ;
- e) Souci des ressources humaines ;
- f) Gestion des processus ;
- g) Résultats.

Il n'existe pas de processus de certification pour cette norme, mais une évaluation extérieure permet d'établir des comparaisons avec d'autres organisations selon le modèle d'excellence employé (voir aussi la figure 1.1).

1 Voir le site Web de la Fondation, à l'adresse :
<http://www.efqm.org>

2 Voir le site Web du NIST, à l'adresse :
<http://www.qualify.nist.gov>

1.2.4

ISO 19011 : Lignes directrices pour l'audit des systèmes de management de la qualité et/ou de management environnemental

Cette norme, qui sert de guide pour procéder à l'audit des systèmes de management de la qualité et/ou de management environnemental, n'a pas de caractère réglementaire. Les activités détaillées suivantes servent à réaliser l'audit de l'organisation :

- a) Principes de l'audit (conduite éthique, présentation équitable, conduite professionnelle, indépendance, approche fondée sur les témoignages) ;
- b) Planification de l'audit (élaboration et mise en œuvre du programme d'audit) ;
- c) Activités d'audit (lancement de l'audit, préparation et réalisation d'activités d'audit sur site, préparation du rapport d'audit) ;
- d) Formation des vérificateurs (compétences, connaissances, compétences générales).

La façon dont un audit est réalisé dépend des objectifs et de la portée de celui-ci, déterminés par la direction du client de l'audit. L'objectif principal du premier audit est de vérifier si le système de management de la qualité est conforme aux exigences de la norme ISO 9001. Dans les audits ultérieurs, on donne la priorité aux interactions et aux interfaces des processus.

Les critères de l'audit sont la documentation du système de gestion de la qualité, la description des processus, le manuel qualité et la réglementation propre à l'organisation.

La planification de l'audit publiée par l'organisation doit indiquer les services concernés de l'organisation ainsi que les critères, les objectifs, l'endroit, la date et l'heure de l'audit pour en garantir la mission.

1.2.5

ISO/CEI 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais

Cet ensemble d'exigences s'applique aux installations, y compris aux laboratoires et aux sites d'essais, qui souhaitent obtenir une accréditation extérieure de leur compétence en matière de processus de mesure et d'essai.

La norme ISO/CEI 17025 aligne ses exigences en matière de gestion sur celles de la norme ISO 9001. Cette norme se divise en deux grandes parties: exigences en matière de gestion et exigences techniques. Ainsi, le système de gestion de la qualité doit respecter les exigences de la norme ISO 9001, qui

incluent les processus décrits ainsi qu'un manuel de gestion établissant un lien entre processus et objectifs et énoncé de principes, ces points devant faire l'objet d'audits réguliers. Tous les processus de laboratoire doivent être approuvés, vérifiés et validés de façon correcte pour respecter les exigences. En outre, le rôle du représentant de la gestion de la qualité (gestionnaire de la qualité) et du chef du laboratoire doit être déterminé.

La mise au point d'analyses d'incertitude pour chacun des processus de mesure, y compris une traçabilité documentée et vérifiée par rapport aux normes internationales de la métrologie, est une composante essentielle des exigences techniques.

1.2.6 ISO/CEI 20000 : Technologies de l'information – Gestion des services

Les SMHN font appel à un matériel informatique pour obtenir des réseaux de mesure des données à utiliser dans les modèles GME/LM et pour offrir aux prévisionnistes des sorties de ces modèles. Les recommandations issues de cette norme sont utiles pour la mise en œuvre de services informatiques fiables. La nouvelle norme ISO/CEI 20000 résume l'ancienne norme britannique BS-15000 et les recommandations de l'IT Infrastructure Library (ITIL). La répartition des exigences suit la structure de l'ITIL.

Les éléments de l'ITIL se divisent en prestation de services et soutien logistique, avec les processus suivants :

- *Prestation de services :*

- a) Gestion au niveau des services ;
- b) Gestion financière ;
- c) Gestion de la continuité des services informatiques ;
- d) Gestion de la disponibilité ;
- e) Gestion de la capacité.

- *Soutien logistique :*

- a) Gestion des changements ;
- b) Gestion des incidents ;
- c) Gestion des problèmes ;
- d) Gestion des déblocages ;
- e) Gestion des configurations.

La gestion de la sécurité est commune aux deux domaines.

Il est nécessaire dans tous les cas :

- a) D'adapter les processus à l'organisation des SMHN ;
- b) De porter une attention particulière à l'appui aux usagers.

Une attention particulière a été portée au processus de gestion des changements, qui peut englober la gestion des déblocages et la gestion des configurations. Normalement, la gestion des incidents et des problèmes passe par la mise en place d'un service de soutien technique aux usagers.

1.2.7 Cadre de référence de l'OMM pour la gestion de la qualité

Le cadre de référence de l'OMM pour la gestion de la qualité présente des recommandations de base fondées sur l'expérience des SMHN. Les conditions nécessaires à une certification au titre de la norme ISO 9001 sont expliquées dans OMM (2005a et 2005b).

Le cadre de référence est un guide pour les SMHN, et surtout pour ceux qui ont peu d'expérience d'un système formel de gestion de la qualité. La mise en place d'un système de gestion de la qualité n'est décrite que brièvement dans la section suivante, sachant que l'OMM ne peut procéder à aucune certification au titre de la norme ISO 9001.

1.3 MISE EN ŒUVRE DE LA GESTION DE LA QUALITÉ

La mise en œuvre de la gestion de la qualité dépend largement de la coopération de la haute direction. Les cadres supérieurs des SMHN doivent s'engager à mettre en place un système de gestion de la qualité et soutenir l'équipe chargée du projet. Les conditions nécessaires d'une certification sont résumées et les termes de la norme ISO 9001 sont expliqués dans ISO 20000.

Les cadres supérieurs définissent une politique et des objectifs en matière de qualité (y compris un engagement à la gestion de la qualité) et le personnel doit être suffisamment formé à la gestion de la qualité pour comprendre le fondement du processus de cette gestion (voir section 1.2.2). Chose la plus importante, il faut créer une équipe chargée du projet pour qu'elle gère le passage à un système formel de gestion de la qualité, y compris la définition et l'analyse des processus employés par l'organisation.

Pour aider l'équipe chargée du projet, on peut donner au personnel responsable de la définition du processus des instructions comprenant normalement les points suivants :

- a) Documenter (mettre sur papier) ce que fait chaque groupe ;
- b) Citer la documentation existante ;
- c) Présenter des preuves ou des indicateurs de ce qui est réalisé ;

- d) Indiquer ce qui peut être fait pour améliorer constamment les processus.

pour faire face aux incidents (par ex. pannes système, accidents du personnel).

Vu que la documentation indique ce que fait l'organisation, il faut que les principaux processus traduisent les fonctions de l'organisation des SMHN. Ces processus peuvent faire partie des processus cités (voir figure 1.4), par exemple :

- La prévision du temps (y compris ses aspects hydrométéorologiques, agrométéorologiques et biométéorologiques humains) ;
- La consultation de services (notamment climatologiques et environnementaux) ;
- La production de données (à partir de réseaux de mesure et d'observation) ;
- Les questions internationales ;
- La recherche-développement (modélisation mondiale, modèles à domaine limité, instruments) ;
- L'infrastructure technique (calculs et communications, appui technique, gestion des données et soutien informatique) ;
- Les processus administratifs (acquisitions, finances et gestion du personnel, organisation, services administratifs et biens immobiliers, gestion des connaissances, planification et contrôle centraux et questions juridiques).

Même si ces processus correspondent aux besoins particuliers des SMHN et donnent naissance à des sous-processus, il devrait y avoir des dispositions

Les processus doivent être introduits dans l'organisation avec des objectifs clairs en matière de qualité et l'ensemble du personnel doit être formé de façon à comprendre ces processus, et notamment l'emploi de procédures et de listes de vérification et la mesure des indicateurs de processus.

Avant de faire une demande de certification, il faut examiner le système de gestion de la qualité en procédant à des audits internes des départements et des divisions de l'organisation, pour vérifier s'ils sont conformes au système de gestion de la qualité tel qu'il est énoncé et promulgué. Ces examens documentés peuvent être effectués sur des produits par des vérificateurs spécialisés et bien formés. Les exigences et les recommandations concernant ces examens sont présentées dans ISO 19011 (voir la section 1.2.4).

L'examen administratif du système de gestion de la qualité inclut les points suivants :

- Résultats d'audits ;
- Réactions de la clientèle ;
- Performances des processus selon des indicateurs de performances ;
- État d'avancement des mesures préventives et correctives ;
- Mesures de suivi des examens administratifs antérieurs ;

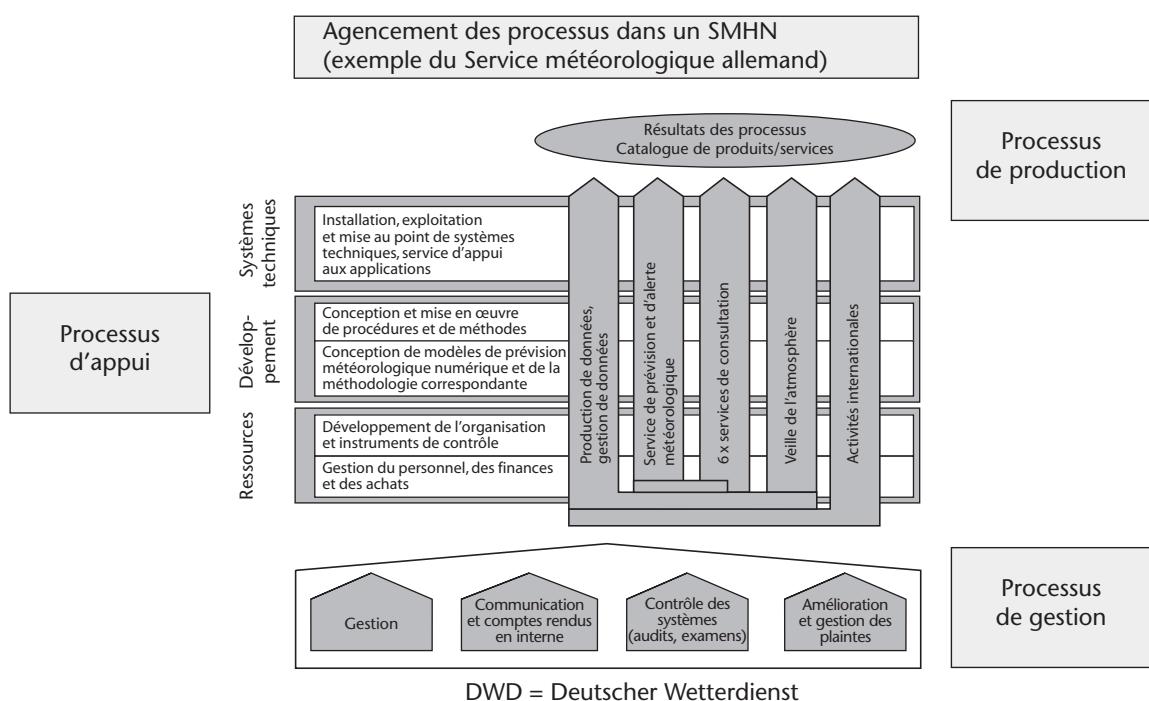


Figure 1.4. Description des processus d'un SMHN (exemple : DWD, OMM 2005a)

- f) Évolution du système de gestion de la qualité (politique de l'organisation) ;
- g) Recommandations en vue d'améliorations.

1.4 ACCRÉDITATION DE LABORATOIRES

L'accréditation exige des processus et une documentation supplémentaires et, chose la plus importante, des preuves que le personnel du laboratoire a reçu une formation et maîtrise les processus et les méthodes à accréditer.

La documentation doit contenir les éléments suivants :

- a) Un manuel de gestion pour le laboratoire ;
- b) Les descriptions de processus mentionnées dans la section 1.2 ;
- c) La documentation concernant l'ensemble des processus et des méthodes ;
- d) Des instructions de travail pour toutes les étapes partielles des processus et des méthodes ;
- e) Des manuels concernant le matériel (y compris les certificats d'étalonnage) ;
- f) Des manuels d'entretien.

Comme les procédures et les méthodes sont susceptibles de changer plus fréquemment que les aspects de l'accréditation relatifs à la gestion, les méthodes ne sont généralement pas citées dans le manuel de gestion. Toutefois, les procédures et les méthodes employées dans le manuel de gestion sont précisément mentionnées.

Comme il est improbable que tous les aspects de l'accréditation soient couverts lors de la mise en place du système de gestion de la qualité, il est recommandé de procéder à un audit préalable et de le coordonner avec l'établissement qui procède à la certification. Lors d'une telle opération, il est normal que cet établissement :

- a) Évalue le personnel et les conditions spatiales préalables ;
- b) Évalue la pertinence du système de gestion ;
- c) Vérifie la documentation ;
- d) Valide la portée de l'accréditation.

La procédure d'accréditation consiste en des évaluations réalisées par un groupe d'experts (extérieur à l'organisation) comprenant un représentant de l'établissement qui procède à la certification. Le groupe d'experts s'occupe de deux grandes questions :

- a) La documentation ;
- b) Un examen des installations qui relèvent de la portée de l'accréditation (laboratoires, sites spéciaux, etc.).

L'évaluation de la documentation couvre la vérification des documents suivants :

- a) Un manuel de gestion (ou un guide du laboratoire) ;
- b) Les instructions relatives aux procédures ;
- c) Les instructions de travail ;
- d) Les instructions pour les essais ;
- e) Les manuels concernant le matériel ;
- f) Les manuels concernant l'entretien ;
- g) Les analyses d'incertitude concernant des quantités données, les résultats d'essais et les étalonnages ;
- h) Des documents servant de preuves (par ex. que le personnel a reçu une formation et que les quantités sont traçables) ;
- i) Des dossiers (par ex. la correspondance avec la clientèle, les certificats d'étalonnage produits).

Le groupe d'experts extérieur peut demander d'autres documents, tous les aspects de la norme ISO/CEI 17025 étant vérifiés, et ce de façon plus détaillée que dans le cas d'une certification au titre de la norme ISO 9001.

Outre une inspection des méthodes de mesure et du matériel associé, l'évaluation des installations relevant de la portée de l'accréditation doit inclure :

- a) Une évaluation du personnel (concernant notamment sa formation et son niveau de responsabilité) ;
- b) Une évaluation de l'infrastructure dont relèvent les méthodes (bâtiments, accès, etc.).

On vérifie aussi les points suivants lors de l'évaluation pour vérifier s'ils correspondent aux objectifs imposés par la direction en vue d'une accréditation :

- a) Structure organisationnelle ;
- b) Qualification du personnel ;
- c) Pertinence des installations techniques ;
- d) Souci de la clientèle.

En outre, lors de l'évaluation, il faudrait vérifier si le laboratoire a fait la preuve des points suivants :

- a) Compétence technique (choix et utilisation du système de mesure) ;
- b) Étalonnage du matériel de mesure ;
- c) Entretien du matériel de mesure ;
- d) Vérification et validation des méthodes.

• Avantages et inconvénients de l'accréditation

Grâce à une accréditation initiale par un établissement indépendant de certification, les SMHN prouvent leur compétence en matière de méthodes de mesures et d'essais météorologiques au titre d'une norme reconnue. Une fois l'accréditation établie, on procède à un audit extérieur périodique qui donne une preuve supplémentaire que les normes ont été respectées et qui, chose plus im-

portante, permet à l'organisation de vérifier qu'elle fait face à ses exigences internes en matière de qualité.

Une accréditation ayant une portée appropriée donne des possibilités commerciales d'étalonnage, de vérification et d'évaluation des appareils de mesure.

Les avantages de l'accréditation sont importants pour les organisations qui ne disposent pas d'un système de gestion de la qualité. D'abord, l'accréditation certifie le système de l'organisation et, à partir de là, on peut faire appel à un processus d'analyse pour accroître l'efficacité de l'organisation. Par exemple, un élément d'accréditation au titre de la norme ISO/CEI 17025 exige des analyses d'incertitude pour chaque étalonnage et essai de vérification. Ces analyses quantitatives donnent des informations sur les points pour lesquels on peut obtenir un maximum d'avantages en employant un minimum de ressources.

Une accréditation ou une certification au titre de tout cadre de gestion de la qualité exige un enregistrement et des audits périodiques effectués par des experts de l'extérieur et par l'établissement chargé de la certification. Ces opérations, qui impliquent des coûts supplémentaires pour l'organisation, dépendent de la portée de l'accréditation et de la certification.

Si l'on cherche à obtenir une accréditation avant qu'un système efficace de gestion de la qualité soit en place, on emploie de plus en plus de ressources et des ressources existantes sont détournées pour établir ce système. On peut aussi prévoir des frais périodiques supplémentaires pour les audits.

1.5 OUTILS DE GESTION DE LA QUALITÉ

Il existe divers outils bien connus qui facilitent le processus du système de gestion de la qualité et de son amélioration constante. On trouvera ci-après trois exemples de tels outils: la carte de pointage équilibrée (Balanced Score card), l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets et Six Sigma.

La carte de pointage équilibrée (Kaplan et Norton (1996)) comprend un minimum de quatre éléments : les finances, la clientèle, les processus et les employés. On ajoute souvent le grand public, vu qu'il faut toujours prendre en compte l'intérêt du public.

Chaque organisation et composante de cette organisation donne lieu à des indicateurs de performances

clefs pour chacun des éléments, eux-mêmes liés à la mission (objet, vision ou objectifs) de l'organisation et à sa stratégie (ou mission de travail et vision).

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets est un moyen d'étudier les causes manquantes et les anomalies éventuelles ainsi que la probabilité de leur apparition. Cette méthode peut être utilisée pour analyser les processus de production et les spécifications des produits. L'objet du processus d'optimisation est de réduire l'ordre de priorité des risques.

La méthode Six Sigma, élaborée dans le secteur des communications, fait appel au contrôle de processus statistiques pour améliorer la production. Elle a pour objet de réduire les défaillances des processus au-dessous d'une valeur donnée.

1.6

FACTEURS INFLUANT SUR LA QUALITÉ DES DONNÉES

Différentes étapes jalonnent l'historique d'un instrument en service sur le terrain, notamment la planification à partir des exigences des utilisateurs, la sélection et l'installation du matériel, le fonctionnement, l'étalonnage, l'entretien et la formation. Pour obtenir des données qui répondent à des critères de qualité établis, il faut prendre les mesures nécessaires à chacune de ces étapes. Dans la présente section, nous décrivons brièvement les facteurs ayant une influence sur la qualité des données. Le lecteur pourra obtenir davantage de renseignements dans d'autres chapitres du Guide et dans d'autres guides et manuels de l'OMM.

• Exigences des utilisateurs

Il est possible d'évaluer la qualité d'un système de mesure par comparaison avec les exigences exprimées par les utilisateurs et donc en fonction de la capacité du système à répondre à ces exigences. Il convient de prendre en compte la compatibilité entre les exigences des utilisateurs quant à la qualité des données et les performances d'un instrument, non seulement au cours des étapes de conception et de planification d'un projet, mais aussi tout au long de l'exploitation. Il faut en outre organiser la mise en œuvre de manière à optimiser les rapports coûts-avantages et coûts-performances. A ce sujet, les utilisateurs, les spécialistes des instruments et les logisticiens se partagent la responsabilité de faire concorder les facteurs techniques avec la réalité financière. En particulier, les spécialistes des instruments doivent étudier les exigences des utilisateurs en matière de qualité des données afin de pouvoir proposer des caractéristiques réalistes, compte tenu de l'état actuel de la technique. Cette étape im-

portante de la conception s'appelle l'analyse de la valeur. Lorsqu'on néglige cette étape, comme c'est souvent le cas, on court le risque de ne pas pouvoir respecter les critères de coût ou de qualité, voire les deux, et parfois même de faire échouer le projet, des efforts étant alors déployés inutilement.

• Caractéristiques fonctionnelles et techniques

La traduction des exigences exprimées en caractéristiques fonctionnelles puis en caractéristiques techniques est une opération à la fois importante et complexe, qui nécessite une connaissance approfondie des exigences des utilisateurs, des techniques de mesure utilisées en météorologie, des méthodes d'observation, de la réglementation de l'OMM ainsi que des conditions de fonctionnement et des infrastructures techniques et administratives à prendre en considération. Les caractéristiques ont un effet considérable sur la qualité des données, puisqu'elles déterminent le fonctionnement général du système de mesure qui sera utilisé.

• Choix des instruments

Il convient de choisir les instruments avec soin en tenant compte des exigences en matière d'incertitude, de portée et de résolution (voir les définitions du chapitre 1, Partie I), des conditions climatologiques et environnementales à prévoir en fonction des applications des utilisateurs, des conditions de fonctionnement et de l'infrastructure technique disponible pour la formation professionnelle, l'installation et l'entretien. En cas de mauvais choix, on risque d'obtenir des données de piètre qualité, sans l'avoir anticipé, ce qui peut causer beaucoup de difficultés lorsque le problème de la qualité sera découvert ultérieurement. Par exemple, en cas de sous-estimation des caractéristiques, il peut s'ensuivre une usure et une dérive excessives. D'une manière générale, il ne faudrait utiliser, pour les besoins de la météorologie, que des instruments de qualité élevée. Le lecteur se reportera aux informations correspondantes dans divers chapitres du présent Guide. De plus amples détails sur les performances de plusieurs instruments figurent en outre dans les comptes rendus des comparaisons internationales d'instruments organisées par l'OMM, dans les rapports des sessions de la Commission des instruments et des méthodes d'observation et dans les actes d'autres conférences internationales sur les instruments et les méthodes d'observation.

• Essais de réception

Avant l'installation et la réception, il est indispensable de veiller à ce que les instruments correspondent bien aux caractéristiques établies à l'origine. Les fabricants doivent publier les performances des instruments et leur sensibilité à divers facteurs, que certifient parfois des laboratoires d'étalonnage. Tou-

tefois, les comparaisons d'instruments qu'organise l'OMM montrent que les instruments peuvent aussi perdre de leur qualité en raison de facteurs pouvant apparaître au cours des étapes de production et de transport. Il est difficile voire impossible de déceler des erreurs d'étalonnage lorsqu'on ne dispose pas des étalons, des installations et des moyens d'essai et d'étalonnage voulus. Dans le cadre d'une bonne gestion, on accordera une place de première importance aux essais à exécuter dans des conditions d'exploitation avant que les instruments entrent en service. Ces essais serviront tant à déterminer les caractéristiques d'un modèle donné qu'à vérifier la qualité réelle de chaque instrument.

En cas d'achat de matériel, il y lieu de penser à exiger du fournisseur qu'il mette en place des procédures certifiées d'assurance de la qualité au sein de son organisation, selon les exigences des SMHN, ce qui réduit la nécessité d'un essai de réception par la suite. Un prix d'achat relativement élevé peut alors se justifier compte tenu des moindres dépenses à consacrer aux essais en interne ou à l'entretien en exploitation ou encore compte tenu de la qualité du fonctionnement en service ainsi garantie.

• Compatibilité

Des problèmes de compatibilité des données peuvent apparaître lorsqu'on se sert d'instruments aux caractéristiques techniques différentes pour exécuter le même type de mesures. Ce cas peut se présenter à diverses occasions : une automatisation des mesures, l'ajout d'instruments nouveaux dotés d'une constante de temps différente, l'utilisation de moyens de protection différents sur les capteurs, l'application d'algorithmes différents de réduction des données, etc. Il convient alors de procéder à des comparaisons de longue durée pour déceler les effets sur la compatibilité et l'homogénéité des données. Le lecteur se reportera aux divers comptes rendus de comparaisons internationales d'instruments publiés par l'OMM.

• Emplacement et exposition

La densité des stations météorologiques varie en fonction des échelles temporelle et spatiale des phénomènes à observer. Elle est en général précisée par l'utilisateur ou fixée par la réglementation de l'OMM. Des cas expérimentaux montrent bien qu'un emplacement et une exposition mal choisis peuvent nuire gravement à l'exactitude et à la représentativité des mesures. Le chapitre 1 de la Partie I présente les critères généraux relatifs au choix de l'emplacement et à l'exposition, tandis que les détails propres aux différents types d'instruments figurent dans les chapitres correspondants de la Partie I. En outre, le lecteur peut se reporter à la réglementation publiée par l'OMM (2003). Par

ailleurs, il convient aussi de porter attention aux facteurs externes qui peuvent engendrer des erreurs de mesure, tels que la poussière, la pollution, le gel, le sel, de fortes variations de la température ambiante ou le vandalisme.

• Erreurs instrumentales

Pour obtenir des données de bonne qualité, il est indispensable de bien choisir les instruments de mesure, mais cela ne suffit pas. Aucune méthode de mesure n'est parfaite et tous les instruments produisent diverses erreurs systématiques et aléatoires. Il faut donc réduire l'effet de ces erreurs sur les données pour atteindre un niveau de qualité acceptable en prenant les mesures préventives et correctives utiles. Ces erreurs varient en fonction du type d'observation ; il en est question dans les paragraphes qui traitent des causes d'erreurs dans divers chapitres du Guide (voir la Partie I).

• Acquisition de données

La qualité des données dépend non seulement de la qualité des instruments, du choix de leur emplacement et de leur exposition, mais aussi des techniques et méthodes utilisées pour obtenir les données et les convertir en données représentatives. Il y a lieu d'établir une distinction entre les mesures automatisées et celles exécutées par des observateurs. Il convient d'adapter les procédures d'échantillonnage et de calcul de moyennes aux caractéristiques techniques d'un capteur, et notamment à sa constante de temps. Pour éliminer les erreurs dues à des sources externes d'interférences et de bruits électriques, il convient d'utiliser un conditionneur de signal placé entre le capteur et le système d'acquisition de données. Le lecteur se reportera aux chapitres 1 et 2 de la Partie II, qui présentent l'échantillonnage et la filtrage. Dans le cas de relevés d'instruments manuels, il est possible que les erreurs de mesure correspondent à des erreurs de conception, de réglage ou de résolution ou découlent d'une formation inadéquate des observateurs. Quant aux observations visuelles ou subjectives, les erreurs peuvent provenir d'une mauvaise interprétation des phénomènes météorologiques due à l'inexpérience des observateurs.

• Traitement des données

Des erreurs peuvent aussi provenir des méthodes de conversion ou des calculs utilisés pour convertir les données d'un capteur en données météorologiques de niveau II ou III. Citons notamment le calcul de l'humidité à partir de l'humidité relative ou du point de rosée mesurée et la réduction de la pression au niveau moyen de la mer. Des erreurs se produisent également lors du codage ou de la transcription de messages météorologiques, surtout s'ils sont effectués par un observateur.

• Contrôle de la qualité en temps réel

La qualité des données dépend des procédures de contrôle de la qualité en temps réel qu'on applique lors de l'acquisition et du traitement des données et de la préparation des messages afin d'éliminer les principales sources d'erreurs. Ces procédures sont particulières à chaque type de mesure, mais elles incluent en général des contrôles grossiers à la recherche de valeurs plausibles et de taux d'évolution et en vue de comparaisons avec d'autres instruments (par ex. le point de rosée ne peut être supérieur à la température). Des contrôles spéciaux s'appliquent aux observations effectuées et aux messages météorologiques rédigés manuellement. Dans les stations météorologiques automatiques, un matériel et des logiciels spécialement conçus peuvent détecter des erreurs matérielles précises. L'application de ces procédures est très importante, car certaines erreurs introduites lors du processus de mesure ne peuvent pas être éliminées ultérieurement. On trouvera un aperçu des méthodes manuelles et automatiques employées dans d'autres paragraphes de ce chapitre, dans le chapitre 1 de la Partie II et dans OMM (1989, 1992, 1993a et 2003).

• Contrôle des performances

Étant donné que les procédures de contrôle de la qualité en temps réel ont des limites et que certaines erreurs peuvent ne pas être détectées, comme les dérives à long terme des capteurs et les erreurs de transmission de données, les centres d'analyse météorologique et les administrateurs de réseaux doivent procéder à un contrôle des performances au niveau des réseaux. Ce contrôle est présenté dans la section 1.8 du présent chapitre. On trouvera également des informations dans le chapitre 1 de la Partie II et dans OMM (1989). Il importe d'établir des procédures de liaison efficaces entre les responsables des contrôles et pour l'entretien et l'étalonnage, afin de favoriser une réaction rapide en cas de lancement de rapports d'anomalies ou de pannes par le système de contrôle.

• Essais et étalonnage

Lors du fonctionnement des instruments météorologiques, leurs performances et leurs caractéristiques changent pour des motifs tels que le vieillissement des composantes matérielles, la dégradation de l'entretien, l'exposition, etc. Cela peut provoquer des dérives à long terme ou des variations brusques d'étalonnage. C'est pourquoi les instruments doivent être inspectés et étalonnés régulièrement pour produire des données fiables. Il faut pour cela disposer de normes et d'installations appropriées d'étalonnage et d'essai. Il faut aussi un plan d'étalonnage efficace et des procédures d'intendance pour l'étalonnage. On trouvera des informations d'ordre général sur les essais et l'étalonnage dans

le chapitre 4 de la Partie III et des renseignements sur les instruments dans les chapitres pertinents de la Partie I.

• Entretien

L'entretien peut être correctif (en cas de panne), préventif (nettoyage, graissage, etc.) ou adaptatif (suite à une modification des besoins ou en cas d'obsolescence). La qualité des données fournies par un instrument dépend en grande partie de la qualité de l'entretien qui, elle-même, est principalement fonction des compétences du personnel d'entretien et des principes de l'entretien. Il importe donc qu'il y ait adéquation entre l'organisme ou service chargé de l'entretien — ses capacités, son personnel et son matériel — et sa fonction spécifique d'entretien suivant les types d'instruments et de réseaux. Il y lieu de prendre en compte plusieurs facteurs tels que le programme d'entretien, qui doit faire état des trois formes d'entretien (correctif, préventif et adaptatif), de la gestion logistique et des moyens et installations de réparation, d'essai et de soutien. Il convient de noter que le coût de l'entretien peut largement dépasser le prix d'achat d'un équipement (voir le chapitre 1 de la Partie II).

• Enseignement et formation professionnelle

La qualité des données dépend aussi des compétences du personnel technique chargé des essais, de l'étalonnage et de l'entretien et de celles des observateurs. Il faudrait donc organiser les programmes d'enseignement et de formation professionnelle rationnellement pour qu'ils répondent aux besoins des utilisateurs et spécialement à ceux de l'entretien et de l'étalonnage ébauchés ci-dessus, et qu'ils soient adaptés au système. Cela importe particulièrement dans le cas des stations météorologiques automatiques. Dans les contrats d'achat de systèmes, il faudrait exiger des fabricants qu'ils fournissent une documentation complète, technique et d'exploitation, et organisent des cours de formation technique et d'exploitation au sein des SMHN (voir le chapitre 5 de la Partie III).

• Métadonnées

Un bon système de gestion de la qualité implique la disponibilité de renseignements détaillés sur le système d'observation même et, en particulier, sur toutes les modifications qu'il subit tout au long de sa période d'exploitation. De telles informations sur les données, appelées métadonnées, permettent à l'exploitant d'un système d'observation de prendre les mesures préventives, correctives et adaptatives les plus appropriées pour maintenir ou améliorer le niveau de qualité des données. Les exigences quant aux métadonnées sont approfondies dans la section 1.9. On trouvera de plus amples informations sur les métadonnées dans le chapitre 1 de la Partie I (et dans l'annexe 1.C).

1.7

ASSURANCE DE LA QUALITÉ (CONTRÔLE DE LA QUALITÉ)

Le document OMM (1983) établit qu'il convient d'appliquer certaines procédures de contrôle de la qualité à toutes les données météorologiques destinées à un échange international. Il faut aussi y assujettir toutes les données de niveau I et celles de niveau II ainsi que la conversion d'un niveau à l'autre. Selon le document OMM (1992), il faut que les centres de traitement des données météorologiques appliquent le contrôle de la qualité à la plupart des messages météorologiques faisant l'objet d'un échange international pour éliminer les erreurs de chiffrage et en vérifier la cohérence interne ainsi que la cohérence sur les plans temporel et spatial et compte tenu des limites physiques et climatologiques. Ce document indique en outre la fréquence minimale et les horaires du contrôle de la qualité.

Le document OMM (1989) présente des directives générales quant aux procédures. Il souligne l'importance que revêt le contrôle de la qualité effectué dans les stations, puisque certaines erreurs introduites à ce niveau ne peuvent être corrigées par la suite, et fait valoir les grands avantages liés à l'automatisation. Le document OMM (1993a) propose des descriptions assez détaillées des procédures que peuvent utiliser les centres d'analyse numérique, donne des directives concernant les limites climatologiques, les types de vérification de cohérence interne et les comparaisons avec les stations voisines ainsi qu'avec des analyses et des pronostics, et présente de brèves remarques sur les probabilités de rejet de données correctes et d'acceptation de données erronées compte tenu de la distribution statistique connue des erreurs.

Le contrôle de la qualité tel qu'il est précisément défini à la section 1.1 s'applique en temps réel ou quasi réel au processus d'acquisition et de traitement des données. Dans la pratique, la responsabilité de ce contrôle est affectée à différents points du processus. Il peut s'agir de stations, lorsque l'acquisition comporte une opération manuelle, ou de divers centres de traitement des données.

Des procédures d'assurance de la qualité doivent être introduites et réévaluées lors des étapes de mise au point de nouveaux capteurs ou systèmes d'observation (voir la figure 5).

1.7.1

Données de surface

1.7.1.1

Observations manuelles et stations dotées de personnel

L'observateur ou le responsable de la station doit veiller à ce que les données transmises aient bien

subi un contrôle de la qualité. Il convient à ce sujet de mettre en place des procédures établies devant lui permettre d'assumer cette responsabilité. Il s'agit là d'une fonction bien précise qui s'ajoute à celles relatives à l'entretien et à la tenue des documents :

- La cohérence interne d'une observation synoptique complète ou d'une autre observation combinée constitue un élément de vérification efficace. Dans la pratique, les observateurs chevronnés auront systématiquement recours à un tel moyen, qui doit néanmoins faire l'objet d'une exigence explicite. Citons en exemple les rapports entre la température, le point de rosée et les extrêmes quotidiens, ou encore entre la pluie, les nuages et les phénomènes météorologiques ;
- Les vérifications climatologiques de la cohérence sont importantes. Les observateurs, connaissant les normales saisonnières des différentes variables au niveau de la station ou disposant de cartes et de tables appropriées, ne doivent pas laisser passer des valeurs leur paraissant inhabituelles sans les vérifier ;
- Il convient d'effectuer des vérifications temporales pour s'assurer que l'évolution depuis la dernière observation est vraisemblable, surtout lorsque les observations n'ont pas été effectuées par le même observateur ;
- Il convient de bien vérifier tous les calculs arithmétiques ainsi que toutes les consultations de tables ;
- Il convient de vérifier le contenu des messages et autres relevés par comparaison avec les données d'origine.

1.7.1.2 Stations météorologiques automatiques

Dans les stations météorologiques automatiques, il faut faire appel au logiciel pour exécuter quelques-unes des vérifications citées ci-dessus ainsi que des vérifications techniques sur les performances du système. Le chapitre 1 de la Partie II traite ce sujet.

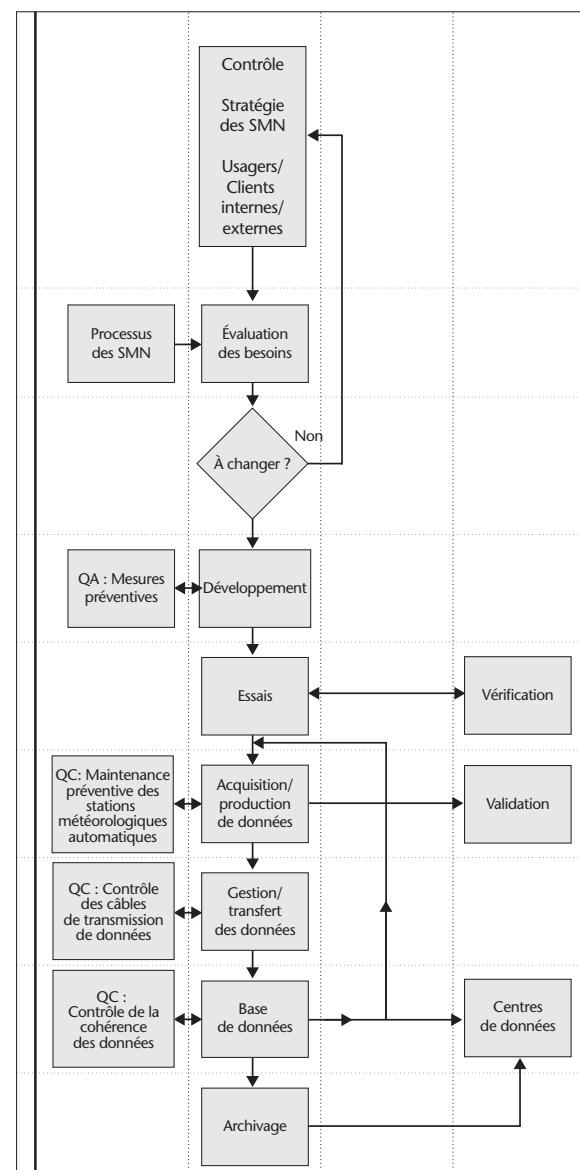
1.7.2 Données aérologiques

Pour l'essentiel, les procédures de contrôle de la qualité s'appliquant aux données de surface s'appliquent aussi aux données aérologiques. Des contrôles devraient être effectués afin d'obtenir une cohérence interne (tels les gradients et les cisaillements), climatologique et temporelle, en harmonie avec les observations de surface normales. Pour les opérations de radiosondage, il est crucial que l'étalonnage de référence soit vérifié explicitement et délibérément. Le message doit également être vérifié avec les données observées.

L'automatisation du contrôle de la qualité dans une station est particulièrement utile pour les données d'observation en altitude.

1.7.3 Centres de données

Il convient que les données subissent une vérification en temps réel ou la plus proche possible du temps réel à la première étape et aux étapes suivantes où elles sont reçues et utilisées. Il est fortement conseillé d'appliquer les mêmes vérifications urgentes à toutes les données, qu'elles soient utilisées ou non en temps réel, car un contrôle de la qualité effectué ultérieurement tend à être moins efficace. Lorsqu'on dispose de procédures automatiques, il



SMN : Service météorologique ou hydrométéorologique national
 QA : Assurance de la qualité
 QC : Contrôle de la qualité

Figure 1.5. Procédure de réalisation d'une observation

faut évidemment les utiliser. Il est cependant possible d'effectuer certains contrôles de la qualité sans l'aide d'un ordinateur ou seulement avec une aide machine partielle. Le principe est qu'il convient de vérifier chaque message, de préférence à chaque étape du cheminement des données.

Habituellement, les vérifications déjà effectuées dans une station sont répétées dans les centres de données, éventuellement sous une forme plus élaborée faisant appel à des moyens automatiques. De plus, les centres de données ont en général accès à d'autres données du réseau, ce qui rend possible une vérification spatiale par comparaison avec les observations provenant de stations voisines ou encore aux champs analysés ou prévus. Il s'agit là d'une méthode très efficace, qui constitue la contribution distinctive d'un centre de données au contrôle de la qualité.

Lorsque des erreurs sont décelées, il convient de rejeter des données ou de les corriger en consultant l'expéditeur ou encore de les corriger dans le centre même par déduction. Cette dernière solution risque évidemment d'introduire des erreurs supplémentaires, mais elle est néanmoins acceptable dans de nombreux cas. Dans la base de données, il convient d'adoindre un indicateur aux données ainsi corrigées. Ces données ne doivent être utilisées qu'avec prudence.

Le processus de contrôle de la qualité produit des données de qualité établie que l'on peut ensuite utiliser pour l'exploitation en temps réel et pour alimenter une banque de données. Par ailleurs, ce processus devrait permettre de regrouper les informations sur les erreurs décelées. Il est bon de mettre en place, lors de la première étape du traitement des données ou à l'étape suivante, un système permettant, en cas d'erreur, d'envoyer immédiatement en retour une information vers le point d'origine des données et d'établir un rapport que l'administrateur réseau utilisera lors du contrôle des performances dont il est question ci-après. Il vaut mieux qu'une telle opération soit effectuée par un centre régional disposant d'un accès immédiat aux stations.

Les procédures détaillées décrites dans OMM (1993a) servent de guide en ce qui concerne le contrôle de la qualité des données destinées à un échange international, selon les recommandations figurant dans OMM (1992).

1.7.4 Rapports avec les stations

Un certain degré de qualité ne peut être maintenu qu'à condition qu'il soit possible de remonter à la source des erreurs pour prendre des mesures correc-

tives. Dans le cas des données provenant de stations dotées de personnel, cette opération donne de très bons résultats en temps quasi réel, non seulement parce qu'il est possible de corriger les erreurs, mais aussi parce le personnel peut en déceler la source et empêcher qu'elles se répètent.

Dans les centres de données ou d'autres centres d'exploitation, il convient de charger une personne de maintenir la communication en temps quasi réel avec les stations ainsi que d'entretenir de bons rapports de travail avec le personnel des stations, ce qui est fort utile lorsque des données erronées sont détectées.

1.8 CONTRÔLE DES PERFORMANCES

Un registre des performances tenu régulièrement, généralement tous les jours et tous les mois, constitue un outil particulièrement important pour la gestion d'un réseau ou d'une station. L'objectif du contrôle des performances est la vérification continue de la qualité des stations d'observation et de chaque système d'observation, comme dans le cas de la mesure de la pression ou du réseau de radiosondage.

Le contrôle des performances revêt plusieurs aspects :

- Il convient, à partir des avis diffusés par les centres de données, d'enregistrer le nombre et le type des erreurs détectées grâce au contrôle de la qualité ;
- Il convient de regrouper les données de chaque station en ensembles synoptiques pour des périodes données, puis d'utiliser ces ensembles pour déceler des différences systématiques entre stations voisines, tant dans les champs spatiaux que dans les séries chronologiques comparatives. Il est utile d'établir des statistiques concernant les différences moyennes et les différences dispersées, sachant que les analyses graphiques donnent de bons résultats dans ces cas ;
- Il convient d'obtenir des stations d'observation des comptes rendus sur les défauts du matériel ou sur d'autres aspects relatifs aux performances.

Ces types de renseignements permettent de déceler avec beaucoup d'efficacité les défauts systématiques propres aux performances, mais aussi de choisir des mesures correctives adaptées. Ce sont des indicateurs efficaces de nombreux facteurs ayant une influence sur la qualité des données, tels que les modifications d'exposition ou d'étalonnage, la

détérioration du matériel, les variations de qualité des consommables ou la nécessité d'un recyclage pour le personnel. Ils sont particulièrement importants en tant qu'indicateurs de confiance pour le matériel automatique.

Il convient d'utiliser les résultats du contrôle des performances pour informer les stations d'observation en retour, ce qui est un élément important pour maintenir un bon niveau de motivation. Ces résultats indiquent aussi quand il y a lieu de réparer ou d'améliorer le matériel d'observation.

Comme le contrôle des performances demande du temps, l'administrateur du réseau doit affecter des ressources adéquates à cette fonction. Le document OMM (1988) présente un système permettant de contrôler les données provenant d'un réseau de stations météorologiques automatiques, qui nécessite un service spécialisé regroupant un petit nombre de personnes. Le service en question est chargé de contrôler les signaux de sortie en temps réel et d'informer les administrateurs de réseaux et les utilisateurs des données. Miller et Morone (1993) décrivent un système qui remplit des fonctions analogues en temps quasi réel et exploite un modèle numérique de moyenne échelle pour effectuer des essais spatiaux et temporels sur les données.

1.9 HOMOGÉNÉITÉ DES DONNÉES ET MÉTADONNÉES

Autrefois, on créait des réseaux d'observation principalement pour répondre aux besoins en données de la prévision du temps. Le contrôle de la qualité en exploitation visait principalement à déceler les valeurs aberrantes et comportait rarement des vérifications portant sur l'homogénéité des données et sur la cohérence des séries chronologiques. L'intérêt majeur accordé aux changements climatiques, surtout en raison de l'inquiétude suscitée par l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, a modifié cette situation. Des tests d'homogénéité des données ont révélé que, parmi les changements climatiques apparents, beaucoup pouvaient être attribués aux inhomogénéités des séries chronologiques, qui découlaient uniquement de modifications touchant l'exploitation des systèmes d'observation. Dans la présente section, nous tentons de résumer les causes de ces inhomogénéités et nous proposons quelques lignes directrices relatives aux informations sur les données, appelées métadonnées, dont il faut disposer pour pouvoir veiller à l'homogénéité des données et faire des recherches sur les changements climatiques.

1.9.1

Causes d'inhomogénéité des données

Les inhomogénéités que provoque la modification des systèmes d'observation prennent la forme de discontinuités abruptes, de variations progressives ou de changements de variabilité. Les discontinuités abruptes résultent principalement du remplacement d'instruments, de la modification de l'emplacement et de l'exposition des instruments, de changements d'emplacement des stations, de changements touchant les calculs de moyennes et les procédures de réduction des données ainsi que de l'application de nouvelles corrections à l'étalonnage. Les inhomogénéités qui prennent la forme d'un effet croissant progressivement peuvent découler d'une modification des alentours de la station, de l'urbanisation ainsi que de variations progressives des caractéristiques des instruments. Les changements de variabilité sont causés par des défauts de fonctionnement des instruments. Viennent s'ajouter à ces causes d'inhomogénéité des modifications de l'horaire des observations, une fréquence insuffisante des activités régulières d'inspection, d'entretien et d'étalonnage et des procédures d'observation non adaptées. À l'échelle d'un réseau, il faut aussi mentionner les problèmes de compatibilité des données. Il est clair enfin que tous les facteurs influant sur la qualité des données entraînent aussi des inhomogénéités.

Le document OMM (1993b) concernant les changements apportés aux radiosondes illustre la gravité du problème et donne un bon exemple du travail minutieux qu'il faut accomplir pour apporter des solutions.

Les changements que subissent les relevés de la température en surface lorsque des stations dotées de personnel sont remplacées par des stations météorologiques automatiques et les relevés aérologiques lorsqu'on remplace des radiosondes sont des causes particulièrement importantes d'inhomogénéité des données. On en est à présent tout à fait conscient et l'on peut en principe les anticiper et les corriger. On peut néanmoins utiliser le contrôle des performances pour confirmer l'efficacité des corrections apportées, voire pour élaborer de telles corrections.

1.9.2

Métadonnées

Des procédures appropriées d'assurance de la qualité dans le cadre du contrôle de la qualité devraient permettre autant que possible d'éviter les inhomogénéités dans les données. Toutefois, cela n'est pas toujours faisable, car parmi les causes d'inhomogénéité, certaines, telles que le remplacement d'un capteur, peuvent correspondre à de réelles

améliorations des méthodes de mesure. Il importe donc de disposer de renseignements sur toutes les inhomogénéités, leur type et surtout le moment où elles apparaissent. Lorsqu'ils disposent de telles informations, les climatologues peuvent, à l'aide de programmes statistiques adaptés, relier les nouvelles données aux anciennes et les regrouper ainsi dans des bases de données homogènes avec un niveau de confiance élevé. Ils extraient d'ordinaire ce type d'informations de renseignements sur les données qu'on appelle métadonnées ou historiques des stations. En l'absence de telles informations, il serait probablement impossible de déceler et de corriger un bon nombre des inhomogénéités mentionnées ci-dessus. On peut considérer les métadonnées comme une version élargie du registre administratif de la station, qui contiendrait tous les renseignements possibles sur l'aménagement initial et sur le type et les dates des changements apportés tout au long de l'exploitation d'un système d'observation. Sachant que les systèmes informatisés de gestion des données prennent une place importante dans le domaine de la production de données, il est souhaitable de regrouper les métadonnées sous la forme d'une base de données, ce qui permet d'effectuer des opérations de composition, de mise à jour et d'exploitation à l'aide d'un ordinateur.

1.9.3 Éléments d'une base de métadonnées

Une base de métadonnées contient des renseignements sur l'installation initiale et sur les mises à jour correspondant aux changements intervenus. Les principaux éléments en sont notamment les suivants :

- a) Informations sur le réseau :
 - Nom de l'exploitant, type et objet du réseau.
- b) Informations sur la station :
 - Renseignements d'ordre administratif ;
 - Emplacement : coordonnées géographiques, altitude(s)³ ;
 - Description des alentours et des obstacles immédiats et éloignés³ ;
 - Disposition des instruments³ ;
 - Aménagements : transmission de données, alimentation électrique, câblage ;
 - Description climatologique.
- c) Informations sur chaque instrument :
 - Type : fabricant, modèle, numéro de série, principes de fonctionnement ;
 - Caractéristiques techniques ;

³ Il convient de joindre des cartes et des plans d'échelle adaptée.

- Renseignements sur les opérations d'étalonnage, y compris leurs dates ;
- Installation et exposition : emplacement, protection, hauteur au-dessus du sol³ ;
- Programme de mesure ou d'observation ;
- Heures des observations ;
- Observateur ;
- Acquisition de données : échantillonnage, calcul de moyennes ;
- Méthodes et algorithmes de traitement des données ;
- Entretien préventif et correctif ;
- Qualité des données (sous la forme d'un indicateur ou d'une incertitude).

1.9.4 Recommandations s'appliquant à un système de métadonnées

L'élaboration d'un système de métadonnées nécessite un travail d'organisation considérable et multidisciplinaire; son exploitation, en particulier l'enregistrement scrupuleux et méticuleusement daté des changements apportés à la base des métadonnées exige une attention constante.

Le document OMM (1994) présente une analyse fort utile des exigences en la matière, comprenant des exemples relatifs aux effets des changements sur les procédures d'observation et une explication des avantages qu'apportent des métadonnées de bonne qualité pour obtenir, à partir de jeux de données discontinus, un relevé climatologique fiable. Il est possible de résumer comme suit les éléments fonctionnels fondamentaux du système de gestion d'une base de métadonnées :

- a) Il convient d'établir des procédures normalisées pour la collecte de mesures se chevauchant dans le temps dans le cas de changements importants : remplacement d'instruments, modification des pratiques d'observation et modification de l'emplacement d'un capteur ;
- b) Il convient d'évaluer régulièrement les problèmes courants d'étalonnage, d'entretien et d'homogénéité dans le but de prendre des mesures correctives s'il y a lieu ;
- c) Il convient d'établir une libre communication entre les personnes chargées de la collecte de données et les chercheurs afin de mettre en place des mécanismes de rétroaction permettant de repérer les problèmes touchant les données, de les corriger ou du moins de les documenter et d'améliorer la documentation ou de la compléter afin de répondre aux exigences des utilisateurs (groupes de travail, par ex.) omises à l'origine ;
- d) Il convient d'établir une documentation détaillée, commode et facilement disponible sur les procédures, les justifications, les essais, les

hypothèses et les problèmes connus relatifs à la construction d'ensembles de données à partir de mesures.

Ces quatre recommandations étant appliquées, un utilisateur de données aurait suffisamment de métadonnées à sa disposition pour manipuler, réunir et résumer les données, sachant que les suppositions à faire concernant leur qualité et leur homogénéité se réduiraient à un minimum.

1.10 GESTION DE RÉSEAUX

Tous les facteurs ayant une influence sur la qualité des données, décrits dans la section 1.6, concernent la gestion des réseaux. Il convient en particulier d'y intégrer les mesures correctives à prendre en fonction des performances du réseau qu'indiquent les procédures de contrôle de la qualité et le contrôle des performances.

Les réseaux sont définis dans OMM (2003) et des directives générales quant à leur gestion sont présentées dans OMM (1989), y compris la structure et les fonctions d'un service chargé de la gestion d'un réseau. Les pratiques de la gestion de réseaux varient grandement selon les dispositions administratives locales.

Il est souhaitable de désigner une personne ou un service comme administrateur de réseau et de charger cet administrateur de la responsabilité fonctionnelle des effets de différents facteurs sur la qualité des données. D'autres spécialistes pouvant être chargés de la gestion et de la mise en œuvre de certains de ces facteurs doivent collaborer avec l'administrateur du réseau et accepter la responsabilité des effets des facteurs en question sur la qualité des données.

L'administrateur du réseau doit suivre de très près les procédures ainsi que les résultats obtenus en ce qui concerne tous les facteurs ayant une influence sur la qualité dont il est question dans la section 1.6 :

- a) Les systèmes de contrôle de la qualité présentés à la section 1.1 constituent des éléments essentiels au bon fonctionnement de tout réseau météorologique et, en général, une priorité pour les utilisateurs de données et l'administrateur du réseau ;
- b) Le contrôle des performances est communément considéré comme une fonction concernant la gestion des réseaux, censée indiquer les mesures à prendre à propos des effets de l'exposition, de l'étalonnage et de l'entretien. Ce

- c) contrôle donne aussi des renseignements sur les effets de certains autres facteurs ;
- d) L'inspection des stations d'observation, décrite ci-après, constitue aussi une fonction relevant de la gestion des réseaux ;
- e) L'entretien du matériel peut faire partie des fonctions relevant directement du service chargé de la gestion d'un réseau. Dans le cas contraire, le service en question et le bureau chargé du matériel devront travailler en collaboration très étroite ;
- f) Des dispositions administratives devraient permettre à l'administrateur d'un réseau de prendre ou de faire prendre des mesures correctives découlant des procédures de contrôle de la qualité, du contrôle des performances, du programme d'inspection ou encore de tout autre facteur influant sur la qualité. Parmi les autres facteurs influant sur la qualité, l'un des plus importants est la formation professionnelle des observateurs, décrite dans le chapitre 5 de la Partie III. Aussi est-il bon que l'administrateur d'un réseau ait son mot à dire quant au contenu et à l'organisation des cours ou à la formation exigée.

1.10.1 Inspections

Il convient d'inspecter régulièrement les stations d'observation, le travail d'inspection étant effectué de préférence par des observateurs chevronnés spécialement désignés. Une inspection permet de contrôler le travail des observateurs ainsi que le matériel et l'exposition des instruments et d'en maintenir la qualité, mais aussi d'améliorer l'utilité des données en tenant à jour l'historique des stations. Elle permet aussi de remplir simultanément diverses fonctions administratives, particulièrement importantes dans le cas des stations dotées de personnel. Les mêmes principes s'appliquent aux stations dotées de personnel, aux stations surveillées par des observateurs bénévoles ou contractuels, parfois à temps partiel et, dans une certaine mesure, aux stations météorologiques automatiques. Les exigences quant aux inspections sont indiquées dans OMM (2003) et des conseils sont donnés dans OMM (1989).

Les rapports d'inspection comprennent une partie des résultats découlant du contrôle des performances.

Il est tout à fait conseillé d'établir des procédures d'inspection complètes et systématiques, de les décrire de façon exhaustive dans des manuels d'inspection et d'entretien et de demander aux inspecteurs de les appliquer. De telles procédures doivent inclure des rapports détaillés des visites d'inspection précédentes et des mesures de suivi.

L'inspecteur devra veiller en particulier aux aspects suivants du fonctionnement d'une station :

- a) *Performances des instruments* : Il convient d'étailler les instruments qui en ont besoin à l'aide d'un étalon approprié. Cela s'applique en tout premier lieu aux instruments de mesure de la pression atmosphérique, puisque tous les baromètres des stations peuvent présenter une certaine dérive. Il convient de vérifier les appareils enregistreurs mécaniques et électriques selon des procédures bien définies. Il convient de soumettre le matériel complexe tel que stations météorologiques automatiques et radars à divers tests de vérification physiques et électriques. Les anémomètres et les abris météorologiques sont particulièrement sujets à divers types de détériorations, ce qui risque de nuire à la qualité des données. Il convient de vérifier l'état physique de l'ensemble du matériel, et notamment son état de propreté, de corrosion, etc. ;
- b) *Méthodes d'observation* : Comme les procédures d'observation peuvent facilement engendrer de mauvaises pratiques, il convient de vérifier constamment le travail de tous les observateurs. L'uniformité des méthodes d'observation et de codage est un élément fondamental pour l'utilisation synoptique et climatologique des données ;
- c) *Exposition* : Il convient de consigner par écrit toute modification des alentours de la station et de la corriger en temps utile, si cela est possible. Il faut parfois envisager un changement d'emplacement.

Parmi les objectifs d'un programme d'inspection des stations dotées de personnel figure la nécessité de maintenir l'intérêt et l'enthousiasme des observateurs. L'inspecteur doit faire preuve de tact et d'en-

enthousiasme, exercer une fonction d'information et savoir obtenir le concours d'autrui.

À l'occasion de chaque visite d'inspection, il convient de remplir un formulaire qui devrait comporter une liste de vérification de l'état et de l'installation du matériel ainsi que des capacités et des compétences des observateurs. On peut aussi utiliser ce formulaire à d'autres fins administratives, par exemple pour établir un inventaire.

Il est essentiel d'enregistrer par écrit, en indiquant la date, toutes les modifications observées au cours d'une inspection, de manière à ce qu'il soit possible d'établir l'historique de la station, ce qui servira ultérieurement dans les études climatologiques et d'autres applications.

En général, on ne peut pas déterminer la fréquence optimale des visites d'inspection, même pour un type donné de station. Cela dépend des compétences des observateurs et de la qualité du matériel, de la rapidité avec laquelle le matériel et l'exposition de la station se détériorent et aussi des changements de personnel et d'installations dans la station. Ainsi un intervalle de deux ans peut être suffisant pour une station bien établie, tandis qu'un intervalle de six mois peut convenir pour une station météorologique automatique. Certains types de stations requièrent des critères d'inspection spéciaux.

Selon ses compétences, l'inspecteur ou l'équipe d'inspection peut être appelé à effectuer une partie de l'entretien du matériel. En général, l'entretien doit être organisé suivant un programme, tout comme le sont les inspections. Cette question n'est pas examinée ici, car les exigences et les types de programmes pouvant y répondre sont très divers.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Deming, W.E., 1986 : *Out of the Crisis : Quality, Productivity and Competitive Position*. University of Cambridge Press, Cambridge.
- Kaplan, R.S. et D.P. Norton, 1996 : *The Balanced Scorecard : Translating Strategy into Action*. Harvard Business School Press, Boston.
- Miller, P.A. et L.L. Morone, 1993 : Real-time quality control of hourly reports from the automated surface observing system. *Texte préliminaire du huitième Symposium sur les observations et les instruments météorologiques*. American Meteorological Society, Boston, p. 373-38.
- Organisation internationale de normalisation, 2000 : *Systèmes de management de la qualité – Exigences*. ISO 9001 : 2000.
- Organisation internationale de normalisation, 2000 : *Systèmes de management de la qualité – Lignes directrices pour l'amélioration des performances*. ISO 9004 : 2000.
- Organisation internationale de normalisation, 2002 : *Lignes directrices pour l'audit des systèmes de management de la qualité et/ou de management environnemental*. ISO 19011 : 2002.
- Organisation internationale de normalisation, 2005 : *Systèmes de management de la qualité – Principes essentiels et vocabulaire*. ISO 9000 : 2005.
- Organisation internationale de normalisation/Commission électrotechnique internationale, 2005 : *Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*. ISO/CEI 17025 : 2005.
- Organisation internationale de normalisation/Commission électrotechnique internationale, 2005 : *Technologies de l'information – Gestion des services – Partie 1 : Spécifications*. ISO/CEI 20000-1 : 2005.
- Organisation internationale de normalisation : *Technologies de l'information – Gestion des services – Partie 2 : Code de bonne conduite*, ISO/CEI 20000-2 : 2005-12, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : Practical experience of the operation of quality evaluation programmes for automated surface observations both on land and over the sea (M. Field et J. Nash). *Documents présentés lors de la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-1988)*. Rapport N° 33 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 222, Genève, p. 335-340.
- Organisation météorologique mondiale, 1989 : *Guide du Système mondial d'observation*. OMM-N° 488, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Manuel du Système mondial de traitement des données*. OMM-N° 485, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993a : *Guide du Système mondial de traitement des données*. OMM-N° 305, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1993b : *Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices* (D.J. Gaffen). Rapport N° 50 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 541, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1994 : Homogeneity of data and the climate record (K.D. Hadeen et N.B. Guttman). *Documents présentés lors de la Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation (TECO-94)*, Rapport N° 57 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD-No. 588, Genève, p. 3-11.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel du Système mondial d'observation*. Volume I, OMM-N° 544, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2005a : *Quality Management Framework (QMF)*. Premier rapport technique de l'OMM (version révisée), WMO/TD-No. 1268.
- Organisation météorologique mondiale, 2005b : *Guidelines on Quality Management Procedures and Practices for Public Weather Services*. PWS-11, WMO/TD No. 1256, Genève.

CHAPITRE 2

ÉCHANTILLONNAGE DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES

2.1 GÉNÉRALITÉS

Le présent chapitre vise à fournir aux non-spécialistes les connaissances générales dont ils ont besoin pour comprendre les notions générales de ce domaine complexe et saisir l'importance des techniques pertinentes.

Les variables météorologiques comme la vitesse du vent, la température, la pression et l'humidité sont fonction de quatre dimensions: deux horizontales, une verticale et une temporelle. Elles fluctuent irrégulièrement en chacune de ces dimensions et l'étude de l'échantillonnage tend à définir des modes pratiques de mesure qui permettent d'obtenir des observations représentatives avec des incertitudes acceptables dans les estimations de la moyenne et de la variabilité.

L'examen de l'échantillonnage dans les dimensions horizontales englobe la question de la représentativité spatiale qui est traitée dans le chapitre 1 de la Partie I, dans d'autres chapitres relatifs à la mesure de grandeurs particulières et succinctement ci-dessous. Il soulève aussi les questions de la conception des réseaux, discipline particulière liée à l'analyse numérique, et de la mesure par radar et satellite de grandeurs intégrées dans une zone donnée; aucune d'elles ne sera abordée ici. L'échantillonnage dans le plan vertical est évoqué brièvement dans les chapitres 12 et 13 de la Partie I et le chapitre 5 de la Partie II. À l'exception de quelques généralités sur la représentativité, le lecteur ne trouvera donc dans le présent chapitre que des explications sur l'échantillonnage temporel que l'on peut traiter à deux niveaux, comme suit :

- a) Au niveau élémentaire, on peut s'en tenir au problème météorologique fondamental qui consiste à obtenir la valeur moyenne d'une grandeur fluctuante représentative d'un intervalle d'échantillonnage spécifié à un instant donné, lorsqu'on utilise des instruments dont le temps de réponse est long en regard des fluctuations ; au plus simple, ceci implique l'examen des éléments statistiques d'un jeu de mesures et du temps de réponse des instruments et des circuits électroniques ;
- b) On peut se livrer à une étude plus fouillée en faisant appel à la théorie de l'analyse des séries chronologiques, à la notion de spectre des fluctuations et au comportement des filtres; la démarche s'impose afin de résoudre le pro-

blème plus complexe que constitue l'emploi d'instruments aux temps de réponse relativement courts pour mesurer convenablement la moyenne ou le spectre d'une grandeur fluctuant rapidement — dont le vent est l'exemple type.

Il est donc logique de commencer par des exposés sur les séries chronologiques, les spectres et les filtres (sections 2.2 et 2.3). La section 2.4 contient des conseils pratiques touchant l'échantillonnage. Les indications données reposent le plus souvent sur l'hypothèse que les intéressés ont les moyens d'appliquer des techniques numériques et de traitement automatique.

Il faut avoir présent à l'esprit qu'on n'échantillonne jamais une grandeur atmosphérique elle-même, mais les sorties du capteur avec lequel on la mesure. La distinction est importante parce que les capteurs ne reproduisent pas exactement la variable observée. Ils réagissent en général plus lentement que l'atmosphère ne change et ils ajoutent un bruit au signal d'entrée. Leur fonctionnement présente des particularités généralement gênantes, comme la dérive de l'étalonnage ou le fait qu'ils répondent de manière non linéaire, qu'ils influent sur la grandeur qu'ils mesurent, qu'ils tombent plus souvent en panne qu'ils ne le devraient, entre autres, mais on se limitera ici à l'analyse de la réponse du capteur et à l'addition du bruit.

Il existe de nombreux ouvrages résumant ce qu'il y a lieu de savoir sur la conception des systèmes d'échantillonnage ou sur l'analyse des données échantillonées; le lecteur consultera par exemple avec profit ceux de Bendat et Piersol (1986), d'Otnes et Enochson (1978), ou encore de Pasquill et Smith (1983), Stearns et Hush (1990), Kulhánek (1976), Jenkins et Watts (1968).

2.1.1 Définitions

Les définitions suivantes ont été retenues aux fins du présent chapitre :

- *Échantillon* : mesure isolée, extraite généralement d'une série de lectures ponctuelles d'un capteur. Cette définition diffère de celle ordinairement utilisée par les statisticiens : jeu de nombres ou de mesures appartenant à une population.

- *Échantillonnage* : processus par lequel s'obtient une suite discrète de mesures d'une grandeur.

- *Filtre* : dispositif servant à atténuer ou sélectionner toute fréquence choisie; le lissage s'effectuant avec un filtre passe-bas, on emploie souvent indistinctement les deux termes lissage et filtrage en ce sens. Il existe cependant aussi des filtres passe-haut et passe-bande. Le filtrage peut provenir d'une caractéristique de l'instrument, telle que son inertie, ou s'opérer électroniquement ou numériquement.

- *Fonction d'échantillonnage ou de pondération* : dans son acceptation la plus simple, algorithme servant à moyenner ou filtrer les échantillons.

- *Fréquence d'échantillonnage* : fréquence à laquelle on prélève les échantillons ; espacement des échantillons : laps de temps les séparant.

- *Intervalle d'échantillonnage* : laps de temps entre deux observations successives.

- *Lissage* : processus consistant à atténuer les composantes à hautes fréquences du spectre sans modifier sensiblement les basses fréquences ; le but visé est généralement d'éliminer le bruit (erreurs aléatoires et fluctuations dépourvues d'intérêt pour l'application considérée).

- *Mesurage* : selon l'ISO, « ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur ». Dans son acceptation courante, ce terme, souvent remplacé par mesure, peut servir à désigner la valeur soit d'un échantillon, soit d'une observation.

- *Observation* : résultat de l'échantillonnage, soit la grandeur transmise ou enregistrée (souvent appelée aussi mesure). Dans le contexte de l'analyse de séries temporelles, une observation s'extrait d'un certain nombre d'échantillons.

- *Temps d'échantillonnage ou période de l'observation* : laps de temps pendant lequel on procède à une observation, c'est-à-dire à la collecte d'un certain nombre d'échantillons.

2.1.2 **Représentativité dans le temps et dans l'espace**

Les observations par échantillonnage s'exécutent à un rythme limité dans un intervalle de temps limité à l'intérieur d'une zone limitée. Dans la pratique, il convient que leur fréquence soit suffisante pour les rendre représentatives des parties non échantillonées de la variable (continue) et elles sont souvent considérées comme représentatives d'un intervalle de temps plus long et d'une zone plus étendue.

L'utilisateur de l'observation en attend qu'elle soit représentative, ou caractéristique, d'une certaine

zone à un moment donné et pendant un intervalle de temps donné. La zone peut être, par exemple, un aéroport, ou celui-ci plus le terrain à portée de vue d'un observateur humain dans un rayon de plusieurs kilomètres. Le temps est l'instant où le bulletin a été rédigé ou le message transmis, l'intervalle de temps est une période convenue, souvent fixée à 1, 2 ou 10 minutes.

Pour que les observations soient représentatives, les capteurs sont installés à des hauteurs normalisées en des endroits bien dégagés et les échantillons sont traités de manière à établir des valeurs moyennes. Dans quelques cas, les capteurs, tels que les transmissomètres, procurent intrinsèquement des moyennes spatiales et ceci contribue à la représentativité de l'observation. L'observation humaine de la visibilité en fournit une autre illustration. On ne reviendra cependant plus à partir d'ici sur l'échantillonnage spatial, pour se concentrer sur l'échantillonnage dans le temps de mesures ponctuelles.

La mesure de la température est un exemple typique du procédé d'échantillonnage et de moyenne dans le temps: les mesures ont lieu toutes les minutes (les échantillons), la moyenne se calcule sur 10 minutes (l'intervalle d'échantillonnage et la fonction d'échantillonnage) et cette moyenne (observation) est transmise toutes les 3 heures dans un bulletin synoptique. Lorsque ces observations sont collectées au même endroit pendant un certain temps, elles deviennent elles-mêmes des échantillons dans une nouvelle séquence chronologique à un intervalle de 3 heures. Si elles proviennent d'un grand nombre d'endroits, elles deviennent aussi des échantillons dans une séquence spatiale. En ce sens, les observations représentatives sont également des échantillons représentatifs. Dans le présent chapitre, nous discutons de l'observation initiale.

2.1.3 **Spectres des grandeurs atmosphériques**

L'opération mathématique appelée transformation de Fourier permet de ramener une fonction irrégulière du temps (ou de la distance) à son spectre, qui est la somme d'un grand nombre de sinusoïdes possédant chacune sa propre amplitude, longueur d'onde (ou période, ou fréquence) et phase. Dans des contextes larges, ces longueurs d'onde (ou fréquences) définissent des « échelles » ou « échelles de mouvement » atmosphériques.

La portée de ces échelles est limitée dans l'atmosphère. À l'une des extrémités du spectre, les échelles horizontales ne peuvent pas être plus longues que la circonférence de la Terre, soit environ 40 000 km. Pour la météorologie, les échelles verticales ne dé-

passent pas quelques dizaines de kilomètres. Dans la dimension temporelle par contre, les échelles les plus longues sont climatologiques et, théoriquement, illimitées, mais en pratique la plus longue période n'excède pas la durée des relevés existants. À l'autre extrémité, la dissipation visqueuse de l'énergie de turbulence en chaleur fixe une limite inférieure. Près de la surface de la Terre, cette limite se situe à une longueur d'onde de quelques centimètres et croît avec l'altitude pour atteindre quelques mètres dans la stratosphère. Dans la dimension temporelle, ces longueurs d'onde correspondent à des fréquences de dizaines de Hertz. Il est exact de dire que les variables atmosphériques sont limitées en bande passante.

La figure 2.1 représente schématiquement le spectre d'une grandeur météorologique, telle que la vitesse du vent, hypothétiquement mesurée à un endroit et un moment particuliers. L'ordonnée, communément appelée énergie ou densité spectrale, est liée à la variance des fluctuations du vent à chaque fréquence n . Dans ce spectre, l'énergie est minimale pour l'échelle moyenne à environ un cycle par heure, entre à des pics pour l'échelle synoptique à environ un cycle en quatre jours et à la micro-échelle au voisinage d'un cycle par minute. Les plus petites longueurs d'onde sont de quelques centimètres et les fréquences les plus élevées de plusieurs dizaines de Hertz.

2.2

SÉRIES CHRONOLOGIQUES, SPECTRES DE PUISSANCE ET FILTRES

Cette section est destinée à initier le profane aux principes directeurs de l'analyse des séries chronologiques qui sont la base d'une bonne pratique de l'échantillonnage. Ils revêtent dans le contexte du Guide un intérêt particulier pour la mesure du vent, mais les mêmes questions se posent à l'égard de la température, de la pression et d'autres grandeurs. Leur importance pour les observations météorologiques courantes s'est accrue avec l'apparition du mesurage automatique parce que celui-ci permettant d'acquérir des échantillonnages fréquents. Si la conception des systèmes laisse à désirer, cela peut être à l'origine de graves erreurs dans les estimations de la moyenne, des extrêmes et du spectre.

Bien que la mesure des spectres ne fasse pas partie des activités ordinaires, elle a de nombreuses applications. Le spectre du vent est important pour les travaux d'ingénierie, et pour la dispersion, diffusion et dynamique de l'atmosphère. Les notions exposées ci-dessous sont également utilisées pour l'analyse quantitative des données de satellite (dans la dimension spatiale horizontale) ainsi qu'en climatologie et en micrométéorologie.

Succinctement, les faits à retenir sont les suivants :

- On peut déterminer le rythme optimal des

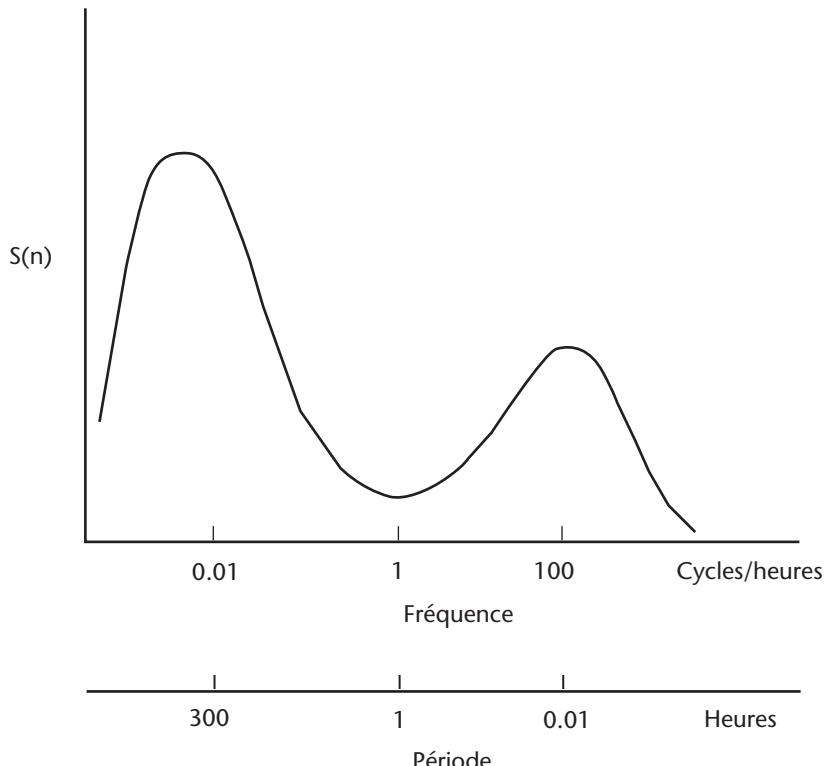


Figure 2.1. Spectre type d'une grandeur météorologique

- échantillonnages d'après la variabilité de la grandeur à mesurer ; les incertitudes entachant la moyenne et les autres éléments statistiques des observations seront d'autant plus faibles que la fréquence des échantillonnages sera plus élevée, c'est-à-dire les échantillons plus grands ;
- b) Selon le théorème de Nyquist, il est possible de déterminer précisément une grandeur qui fluctue constamment à partir d'une série d'échantillons à l'espacement constant, s'ils sont assez proches les uns des autres ;
 - c) Si la fréquence des échantillonnages est trop faible, des fluctuations aux fréquences non échantillonées les plus hautes (supérieures à la fréquence de Nyquist définie à la section 2.2.1 ci-dessous) affecteront l'estimation de la valeur moyenne; elles affecteront de surcroît le calcul des basses fréquences et fausseront le spectre mesuré. Cet effet, appelé repliement de spectre, peut engendrer de graves erreurs si on le méconnaît et si on n'en tient pas compte dans la conception des systèmes ;
 - d) On évite le repliement de spectre en adoptant une fréquence d'échantillonnage élevée ou, solution plus commode, en se servant d'un filtre qui permet d'utiliser une fréquence d'échantillonnage plus petite ;
 - e) Les filtres peuvent être numériques ou analogiques ; un capteur dont le temps de réponse est suffisamment long se comporte comme un filtre.

Pour bien maîtriser l'échantillonnage il faut être familiarisé avec les spectres de puissance, le théorème de Nyquist, le filtrage et l'inertie des instruments. Il s'agit là de sujets hautement spécialisés dont l'abord exige de solides connaissances sur les caractéristiques des capteurs employés, la manière dont les sorties du capteur sont conditionnées, traitées et enregistrées les caractéristiques physiques des éléments à mesurer et les fins auxquelles les données analysées doivent servir. Ceci requiert en conséquence des compétences qui s'étendent à la physique des instruments, au fonctionnement des systèmes électroniques, de traitement et d'enregistrement, aux mathématiques, à la statistique et à la météorologie des phénomènes observés — et sortent donc largement du cadre de cet exposé.

Un profane peut néanmoins comprendre quels sont les bonnes pratiques à respecter pour mesurer convenablement les moyennes et les extrêmes et acquérir une juste vision des problèmes associés à la mesure des spectres.

2.2.1 Analyse de séries chronologiques

Il est nécessaire de considérer que les signaux s'inscrivent dans les domaines soit du temps, soit de la

fréquence. L'analyse spectrale repose essentiellement sur le concept des transformations de Fourier. Une fonction $f(t)$, définie entre $t = 0$ et $t = \tau$, peut être transformée en la somme d'un ensemble de fonctions sinusoïdales :

$$f(t) = \sum_{j=0}^{\infty} [A_j \sin(j\omega t) + B_j \cos(j\omega t)] \quad (2.1)$$

où $\omega = 2\pi/\tau$. Le second membre de l'équation est une série de Fourier. A_j et B_j expriment les amplitudes des contributions des composantes aux fréquences $n_j = j\omega$. Ceci constitue la transformation fondamentale entre les domaines du temps et de la fréquence. Les coefficients de Fourier A_j et B_j se rapportent directement à la fréquence $j\omega$ et peuvent être associés aux contributions spectrales à $f(t)$ dans ces fréquences. Dès lors qu'on connaît la réponse en fréquence d'un instrument, c'est-à-dire de combien il amplifie ou atténue certaines fréquences, ainsi que de combien ces fréquences contribuent au signal original, on peut calculer l'effet de la réponse en fréquence sur le signal de sortie. La contribution de chaque fréquence se caractérise par deux paramètres que, pour plus de commodité, il est loisible d'assimiler à l'amplitude et à la phase de la composante fréquentielle. Si donc on donne à l'équation 2.1 sa deuxième forme possible :

$$(f(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j \sin(j\omega t + \phi_j)) \quad (2.2)$$

l'amplitude et la phase associées à chaque contribution spectrale sont α_j et ϕ_j ; toutes deux peuvent être affectées par l'échantillonnage et le traitement.

La fonction $f(t)$ a été jusqu'ici supposée connue sans interruption sur toute l'étendue de la gamme $t = 0$ à $t = \tau$; en réalité c'est rarement le cas: les variables météorologiques sont mesurées en des points discrets d'une série chronologique composée de N échantillons prélevés à des intervalles égaux Δt durant une période spécifiée $\tau = (N-1)\Delta t$. On suppose également que les échantillons sont prélevés instantanément, ce qui n'est pas tout à fait vrai car tous les dispositifs de mesure mettent un certain temps à déterminer la valeur qu'ils mesurent. Dans la plupart des cas, ce temps est court comparativement à l'intervalle Δt entre les échantillons. Même s'il ne l'est pas, il reste possible de tenir compte du temps de réponse dans l'analyse, mais on n'en traitera pas ici.

Si l'on considère les données que fournirait l'échantillonnage d'une fonction sinusoïdale à des intervalles de temps Δt , on constate que la plus haute fréquence détectable est $1/(2\Delta t)$ et qu'en fait toute sinusoïde de fréquence supérieure susceptible de figurer dans la série chronologique se trouve repré-

sentée dans les données comme ayant une fréquence inférieure. La fréquence $1/(2\Delta t)$ est appelée fréquence de Nyquist et désignée ici par n_y . On l'appelle aussi parfois fréquence de repliement, par référence au biais d'analyse des données schématisé dans la figure 2.2. Quand on effectue l'analyse spectrale d'une série chronologique, en raison du caractère discret des données, la contribution de fréquence n à l'estimation contient aussi les contributions de fréquences plus élevées, à savoir celles de $2jn_y \pm n$ ($j = 1$ à ∞). L'une des façons de se représenter la distorsion est d'imaginer que le domaine des fréquences se replie sur lui-même comme le soufflet d'un accordéon à $n = 0$ et $n = n_y$, et ainsi de suite par pas de n_y . L'estimation spectrale à chaque fréquence de la gamme est la somme de toutes les contributions des hautes fréquences qui s'y superposent.

Les effets concrets du repliement de spectre sont étudiés à la section 2.4.2. Il constitue potentiellement un gros problème et il faut en tenir compte dans la conception des systèmes d'instruments. On

peut l'éviter en minimisant, ou ramenant à zéro, la puissance du signal aux fréquences supérieures à n_y . Il existe deux façons d'y parvenir. La première consiste à inclure dans le système un filtre passe-bas qui atténue les contributions aux fréquences supérieures à n_y avant que le signal ne soit numérisé ; le seul inconvénient est que l'instant de survenue et l'ampleur des changements rapides seront mal enregistrés, voire pas enregistrés du tout. La seconde consiste à choisir t assez court pour que les contributions au-dessus de la fréquence de Nyquist soient insignifiantes ; c'est possible parce que le spectre de la plupart des variables météorologiques s'affaisse très rapidement aux très hautes fréquences. La seconde démarche n'est cependant pas toujours praticable : si, par exemple, t est de l'ordre de plusieurs heures pour des mesures de température effectuées toutes les 3 heures, les ordonnées spectrales des petites fluctuations de quelques minutes ou quelques secondes seront relativement grandes et le repliement très prononcé. Dans ce cas, il vaut mieux employer la première méthode.

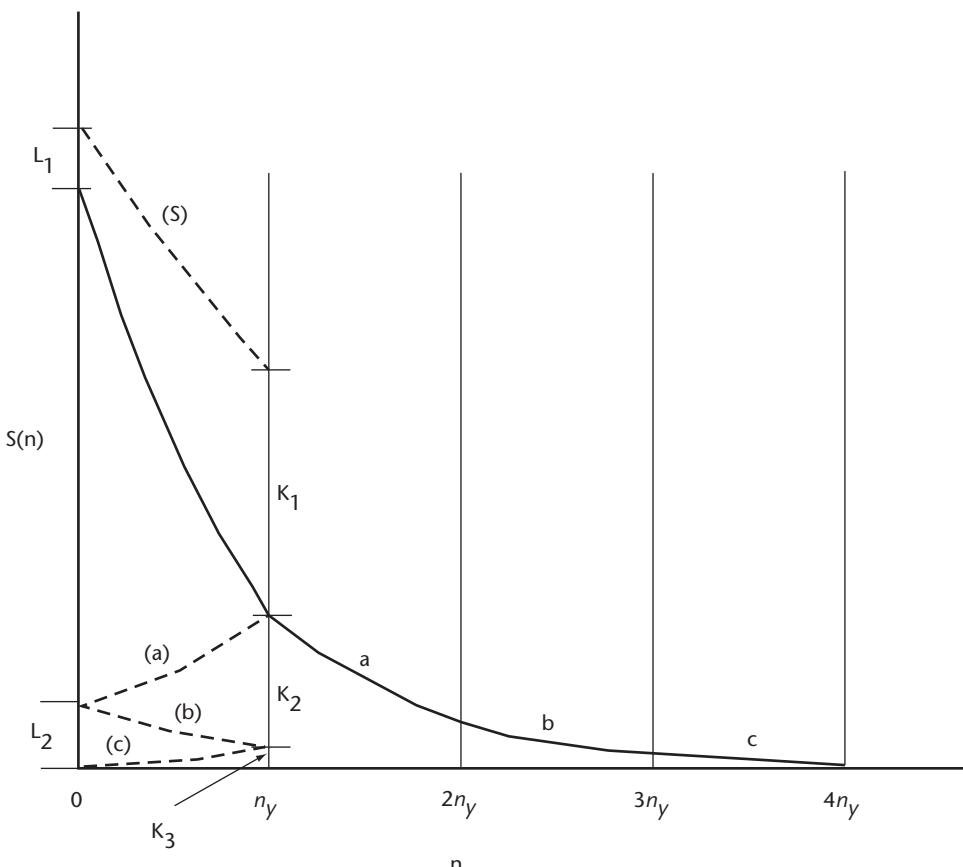


Figure 2.2. Représentation schématique du repliement d'un spectre calculé à partir d'une série chronologique stationnaire. On ne peut calculer le spectre que dans la plage comprise entre la fréquence zéro et la fréquence de Nyquist n_y . Les valeurs vraies des énergies aux fréquences plus élevées sont représentées par les secteurs a, b et c qui se trouvent «repliés» sur le secteur allant de $n = 0$ à n_y , de la manière indiquée par les tracés en pointillé (a), (b) et (c). Le spectre calculé, matérialisé par le pointillé en trait gras (S), en contient la somme.

2.2.2

Mesure des spectres

La densité spectrale, du moins telle qu'on l'estime à partir de séries chronologiques, se définit par :

$$S(n_j) = (A_j^2 + B_j^2) / n_y = \alpha_j^2 / n_y \quad (2.3)$$

On notera que la phase n'entre pas en ligne de compte.

Le spectre d'une grandeur fluctuante peut se mesurer de différentes manières. Les électrotechniciens le déterminaient souvent, naguère, en envoyant le signal dans des filtres passe-bande et mesurant le courant de sortie, dont ils comparaient ensuite la puissance à celle de la fréquence centrale du filtre.

Il existe aussi différentes façons de procéder à l'analyse spectrale d'une série chronologique. La plus évidente est de lui faire subir une transformation de Fourier directe. Comme la série n'a qu'une longueur finie, la transformation ne comprend qu'un nombre fini de composantes fréquentielles. Si la série se compose de N termes, l'analyse donnera $N/2$ fréquences. Le calcul direct étant une opération laborieuse, d'autres méthodes ont été mises au point. La première fut celle de Blackman et Tukey (1958) qui consistait à établir le rapport entre la fonction d'autocorrélation et des estimations de diverses fonctions spectrales (la fonction d'autocorrélation $r(t)$ est le coefficient de corrélation calculé entre des termes de la série chronologique séparés par un intervalle de temps t). Imposée par la faible puissance des moyens informatiques disponibles dans les années 1950 et 1960, elle a depuis cédé le pas à la transformation de Fourier rapide (TFR) qui tire parti de la plus grande vitesse de calcul des ordinateurs modernes. Sa principale faiblesse est que la série chronologique doit contenir 2^k termes, où k est un nombre entier. Ce n'est en général pas trop gênant puisqu'on possède dans la plupart des cas assez de données pour organiser aisément la série jusqu'à une telle longueur. On peut aussi, avec certains logiciels TFR, utiliser un nombre arbitraire de termes et ajouter des données artificielles pour parvenir à 2^k .

En raison de sa durée finie (N termes), la série chronologique ne représente qu'un échantillon du signal concerné. Les coefficients de Fourier ne sont donc qu'une estimation de la valeur vraie ou valeur de la population. Afin d'en améliorer la fiabilité, la pratique usuelle est d'établir la moyenne d'un certain nombre de termes de part et d'autre de chaque fréquence et de prendre cette moyenne comme la valeur de cette fréquence ; l'intervalle de confiance de l'estimation s'en trouve rétréci. Comme ordre de grandeur, on estime empiriquement que 30 degrés de liberté sont pratiquement suffisants. Chaque es-

timation faite durant la transformation de Fourier ayant 2 degrés de liberté (associés aux coefficients du sinus et du cosinus), on établit habituellement la moyenne d'une quinzaine de termes. Le chiffre 16 est celui qui convient le mieux quand on applique une TFR puisque 16 égale 2^4 et que le nombre des estimations spectrales s'élève alors exactement à $2(k/2)^4$ par exemple, si la série chronologique compte 1 024 termes, on aura 512 estimations des A et B et 64 estimations lissées.

Les méthodes décrites ci-dessus font de plus en plus partie intégrante des systèmes météorologiques, et pas uniquement pour l'analyse des données. Comme on l'imagine sans peine, les spectres qu'on rencontre en météorologie revêtent des formes très différentes selon qu'ils représentent, à une extrémité de la gamme, les plus basses fréquences associées à l'évolution du climat, à l'autre extrémité la turbulence ou l'agitation moléculaire, en passant par les changements annuels et saisonniers, les conditions synoptiques durant des périodes de plusieurs jours, les variations journalières ou semi-journalières et les phénomènes à moyenne échelle locaux. Ce qui offre de l'intérêt pour la plupart des applications météorologiques, y compris l'analyse synoptique, sont les laps de temps allant de quelques secondes à quelques minutes, où le spectre décroît très rapidement avec la fréquence. Sur des périodes inférieures à la minute, le spectre prend souvent des valeurs proportionnelles à $n^{-5/3}$, si bien que les contributions des fréquences supérieures à 1 Hz y demeurent relativement faibles.

L'une des propriétés importantes du spectre est que :

$$\sum_{j=0}^{\infty} S(n_j) = \sigma^2 \quad (2.4)$$

où σ^2 est la variance de la grandeur mesurée. Il est souvent commode pour l'analyse d'exprimer le spectre sous une forme continue, de sorte que l'équation 2.4 devient :

$$\int_0^{\infty} S(n) dn = \sigma^2 \quad (2.5)$$

Il ressort des équations 2.4 et 2.5 que les modifications du spectre provoquées, notamment par le système d'instruments, affecteront la valeur de σ^2 et par conséquent les propriétés statistiques de la sortie relativement à l'entrée. Ce peut être un point important à considérer dans la conception des instruments et dans l'analyse des données.

On notera aussi que le premier membre de l'équation 2.5 représente la surface sous la courbe de la figure 2.2. Le repliement du spectre ne modifie pas

cette zone, et donc pas la variance, si la série chronologique est stationnaire, c'est-à-dire si son spectre ne change pas au cours du temps.

2.2.3 Réponse du système d'instruments

Les capteurs et les circuits électroniques qu'on leur adjoint éventuellement afin de former un système d'instruments ont des temps de réponse et exercent un effet de filtrage qui influent sur les observations.

Aucun système d'instruments, météorologique ou non, ne suit exactement la grandeur qu'il mesure. Il n'y a pas en général de moyen simple pour la réponse d'un système, mais il est néanmoins possible d'en obtenir une approximation convenable. Les réponses les plus simples peuvent être dites du premier et du deuxième ordre, par référence au degré de l'équation différentielle utilisée pour approximer la réponse du système i . Les notions exposées ci-dessous font l'objet d'examens plus approfondis dans de nombreux manuels de physique et ouvrages spécialisés (par exemple MacCready et Jex, 1964).

Dans un système du premier ordre, comme un capteur ordinaire ou le plus rudimentaire des circuits de filtrage passe-bas, le rythme auquel change la valeur indiquée par l'instrument est directement proportionnel à la différence entre celle-ci et la valeur vraie de la variable mesurée. Si donc la valeur vraie à l'instant t est $s(t)$ et la valeur enregistrée par l'instrument $s_0(t)$, le système se décrit par l'équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{ds_0(t)}{dt} = \frac{s(t) - s_0(t)}{T_I} \quad (2.6)$$

où T_I est une constante, qui a la dimension d'un temps, caractéristique du système. La réponse d'un système du premier ordre à une fonction échelon est proportionnelle à $\exp(-t/T_I)$ et on observe que T_I est le laps de temps qu'il faut au système, après toute variation d'un échelon, pour atteindre 63 pour cent de la lecture finale qu'on aurait en régime établi. L'équation 2.6 s'applique à de nombreux capteurs tels que les thermomètres.

Un anémomètre à coupelles constitue un instrument du premier ordre, à ceci près que T_I n'est pas constant mais varie avec la vitesse du vent. En fait, on dénomme constante de distance le paramètre $s_0 T_I$ parce qu'il est, lui, presque constant. L'équation 2.6 n'est plus dès lors une égalité simple du premier ordre car elle devient non linéaire et sa solution très compliquée. Une autre difficulté provient de ce que T_I n'est pas le même selon que la vitesse de rotation des coupelles croît ou décroît, c'est-à-dire selon que le deuxième membre de l'équation est positif

ou négatif. L'explication en est que le coefficient de résistance des coupelles est plus faible quand le vent arrive de face que quand il vient de derrière.

La girouette s'apparente à un système du deuxième ordre parce que, comme cela est vrai de tout corps oscillant, un pendule par exemple, la rapidité avec laquelle elle se place dans la direction véritable du vent est proportionnelle à la distance qui l'en sépare. Le mouvement des girouettes est amorti à la fois naturellement et en raison de leur dessin par une force de résistance proportionnelle et opposée au rythme de ce mouvement. L'équation différentielle rendant compte de leur comportement s'écrit par conséquent :

$$\frac{d^2\phi_0(t)}{dt^2} = k_1[\phi_0(t) - \phi(t)] - k_2 \frac{d\phi_0(t)}{dt} \quad (2.7)$$

où ϕ est la direction véritable du vent, ϕ_0 est la direction de la girouette, k_1 et k_2 sont des constantes. Sa solution est une oscillation amortie à la fréquence naturelle de la girouette (déterminée par la constante k_1). L'amortissement, gouverné par la constante k_2 , joue bien sûr un rôle primordial. S'il est trop faible, la girouette oscille simplement à la fréquence naturelle ; s'il est trop fort, elle ne réagit pas aux changements de direction du vent.

Il est instructif d'examiner la façon dont ces deux systèmes répondent à un changement d'un échelon du signal d'entrée car elle est exemplaire de ce qui se passe dans la réalité. Les figures 2.3 et 2.4 matérialisent les réponses à ce changement, données par la solution analytique des équations 2.6 et 2.7. On notera que ce n'est dans aucun des deux cas la valeur réelle de l'élément que mesure le système, et aussi que le choix des valeurs attribuées aux constantes k_1 et k_2 peut influer grandement sur les sorties.

Une caractéristique importante d'un système d'instruments est sa fonction de réponse fréquentielle ou fonction de transfert $H(n)$. Elle donne la portion du spectre que le système transmet, laquelle peut s'exprimer par :

$$S(n)_{out} = H(n) S(n)_{in} \quad (2.8)$$

où les indices *out* et *in* désignent les spectres de l'entrée et de la sortie. On remarquera qu'en vertu de la relation établie dans l'équation 2.5, la variance de la sortie dépend de $H(n)$. $H(n)$ définit les effets de filtrage exercés par le capteur (section ci-dessous). Leurs modes de calcul ou de mesure forment l'objet de la section 2.3.

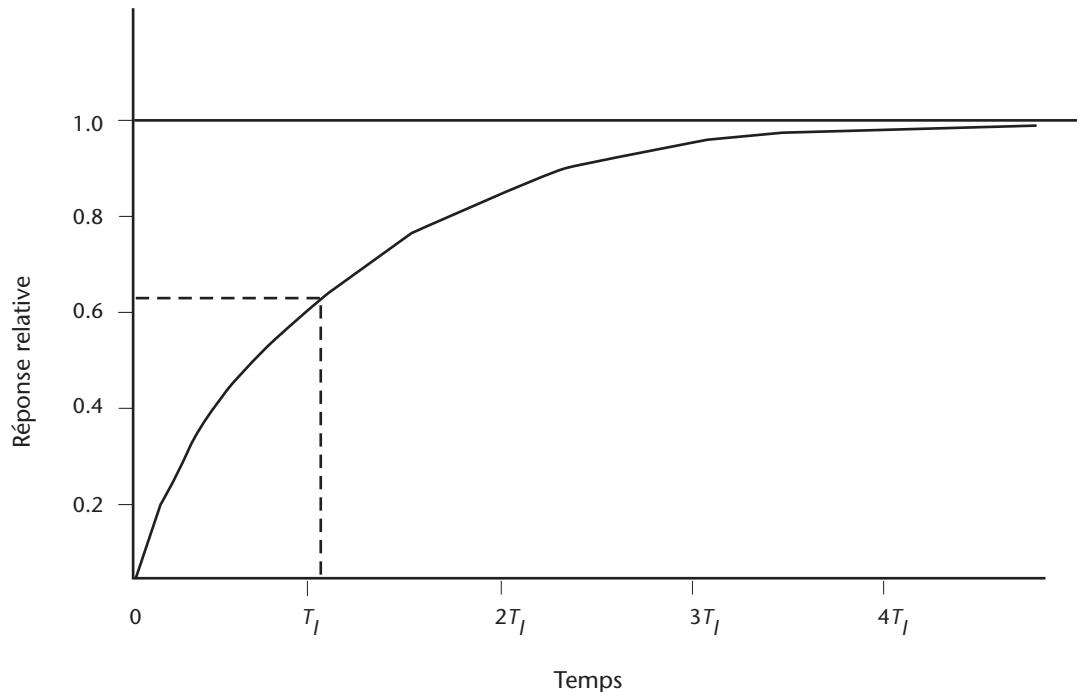


Figure 2.3. Réponse d'un système du premier ordre à un changement d'un échelon.
À l'instant $T_{(0)}$, le système a atteint 63 pour cent de sa valeur finale.

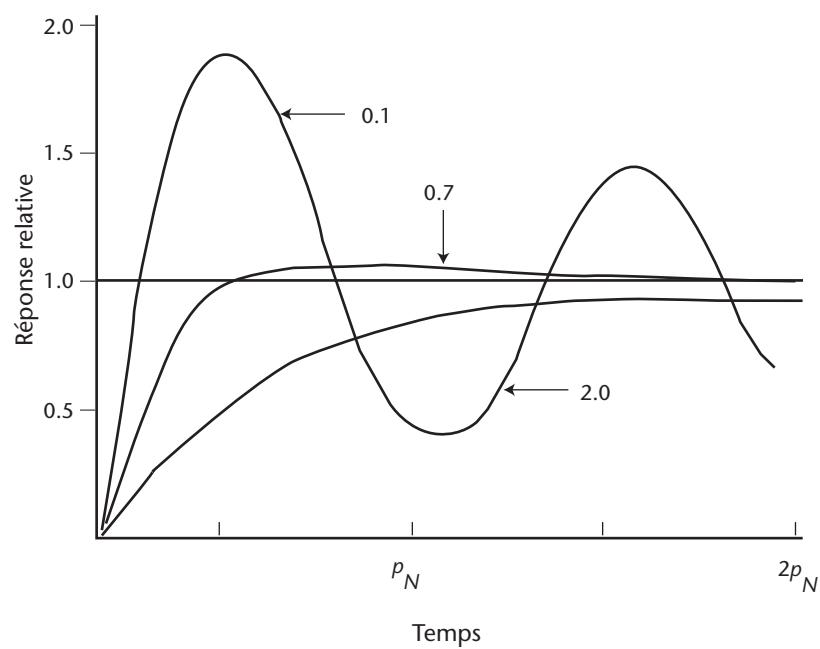


Figure 2.4. Réponse d'un système du deuxième ordre à un changement d'un échelon. p_N est la période naturelle, liée à k_1 dans l'équation 2.7, qui pour une girouette dépend de la vitesse du vent. Les courbes correspondent aux facteurs d'amortissement 0,1 (très léger), 0,7 (critique, optimal pour la plupart des fins) et 2 (fort). Le facteur d'amortissement est lié à k_2 dans l'équation 2.7.

2.2.4 Filtres

Cette section traite des propriétés des filtres et offre quelques exemples de la façon dont ils peuvent influer sur les données.

Le filtrage est le processus consistant à traiter une série chronologique (continue ou discrète, à savoir échantillonnée) de sorte que la valeur assignée à un instant donné soit pondérée par les valeurs qui se sont établies à d'autres instants. Dans la plupart des cas, ces derniers seront immédiatement voisins de l'instant donné. C'est ainsi que, dans une série chronologique discrète de N échantillons numérotés de 0 à $N-1$ ayant les valeurs y_i , la valeur de l'observation filtrée \bar{y}_i peut se définir par :

$$\bar{y}_i = \sum_{j=-m}^m w_j y_{i+j} \quad (2.9)$$

Le filtre contient en l'occurrence $2m + 1$ termes, numérotés de $-m$ à $+m$ par la variable binaire j , et \bar{y}_i est centré à $j = 0$. Quelques données sont rejetées au début et à la fin de la période d'échantillonnage. w_j est communément appelée fonction de pondération et d'ordinaire :

$$\sum_{j=-m}^m w_j = 1 \quad (2.10)$$

si bien qu'au moins la valeur moyenne de la série filtrée sera la même qu'avant le filtrage.

L'exemple ci-dessus se rapporte à un filtrage numérique. On obtient les mêmes effets avec un dispositif électronique (par exemple, résistance et condensateur) ou par le biais des caractéristiques du capteur (cas de l'anémomètre étudié précédemment). Qu'il soit numérique ou analogique, le filtre est caractérisé par $H(n)$. S'il est numérique, $H(n)$ peut se calculer ; s'il est analogique, $H(n)$ s'obtient par l'une des méthodes décrites dans la section 2.3.

Comparons par exemple un filtre du premier ordre dont le temps de réponse est T_f à un filtre rectangulaire (boxcar) de longueur T_s sur une série chronologique discrète provenant d'un capteur qui répond bien plus rapidement. La figure 2.5 montre la forme des deux filtres. Tout se passe avec le premier comme si l'instrument était doté d'une mémoire maximale à l'instant présent, mais faiblissant exponentiellement à mesure que les données deviennent plus anciennes. Tous les coefficients

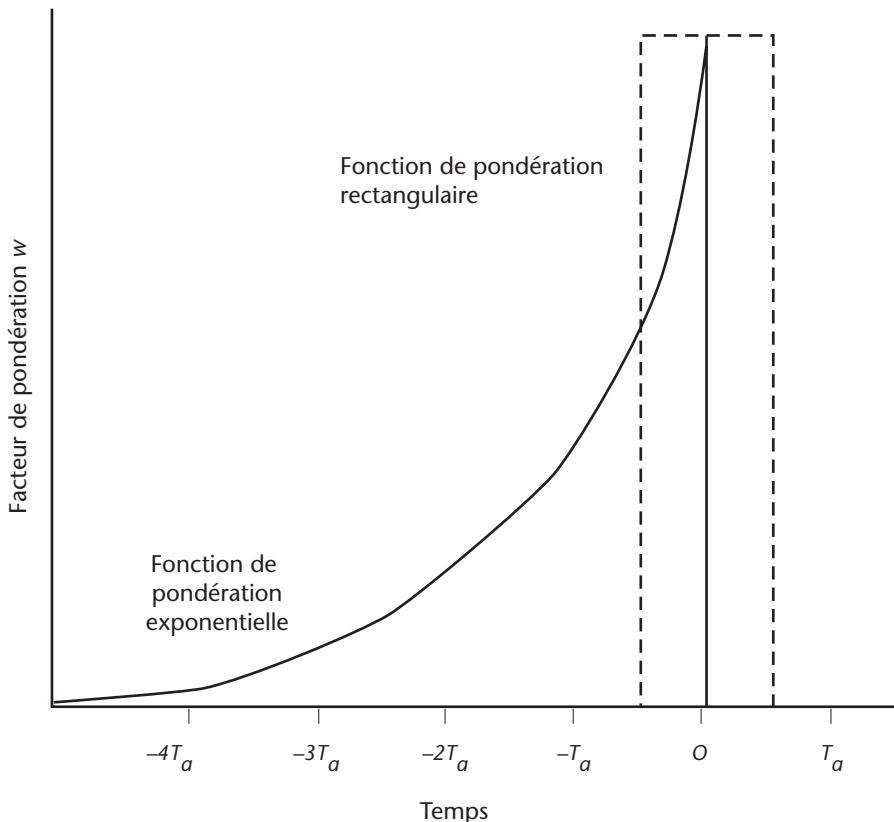


Figure 2.5. Facteur de pondération pour une fonction de pondération du premier ordre (exponentielle) et une fonction de pondération rectangulaire. Dans le second cas, $T_a = T_s$, la période d'échantillonnage, et $w = 1/N$. Dans la fonction de premier ordre, $T_a = T_f$, la constante de temps du filtre, et $w(t) = 1/T_f \exp(-t/T_f)$.

de pondération du filtre rectangulaire sont égaux jusqu'au temps T_s , nuls au-delà. La figure 2.6 représente les fonctions de réponse en fréquence $H(n)$ des deux filtres.

Dans cette figure, les fréquences ont été mises à l'échelle pour faire ressortir la similarité des deux fonctions de réponse. On constate qu'un instrument dont le temps de réponse est, par exemple, de 1 s produit sur une entrée à peu près le même effet qu'un filtre rectangulaire appliqué pendant 4 s. Il convient toutefois de noter qu'un filtre rectangulaire, qui se calcule numériquement, ne se comporte pas simplement: il n'élimine pas toutes les fréquences supérieures à celle de Nyquist et ne peut être utilisé valablement que si le spectre s'affaisse rapidement au-delà de n_y . (Remarque : le filtre rectangulaire de la figure 2.6 est une solution analytique du cas où w est une fonction continue ; si le nombre d'échantillons présents dans le filtre est petit, la coupure est moins brutale et les pics de haute fréquence indésirables sont plus importants).

Le lecteur trouvera dans Acheson (1968) des avis pratiques sur les filtres rectangulaires (carbox), le filtrage exponentiel et une comparaison de leurs effets.

La figure 2.7 représentant la fonction de réponse d'un système du deuxième ordre, une girouette en l'occurrence, montre comment l'amortissement joue le rôle de filtre passe-bande.

On voit que le traitement des signaux par les systèmes peut avoir des effets considérables sur les données de sortie et qu'il demande un grand savoir-faire.

Les filtres peuvent aussi modifier la signification statistique des données, ainsi qu'on l'a indiqué précédemment et que l'illustrent les équations 2.5 et 2.8. L'équation 2.5 montre comment l'intégrale du spectre pour toutes les fréquences donne la variance de la série chronologique, l'équation 2.8 montre comment le filtrage, par l'effet de la fonction de transfert,

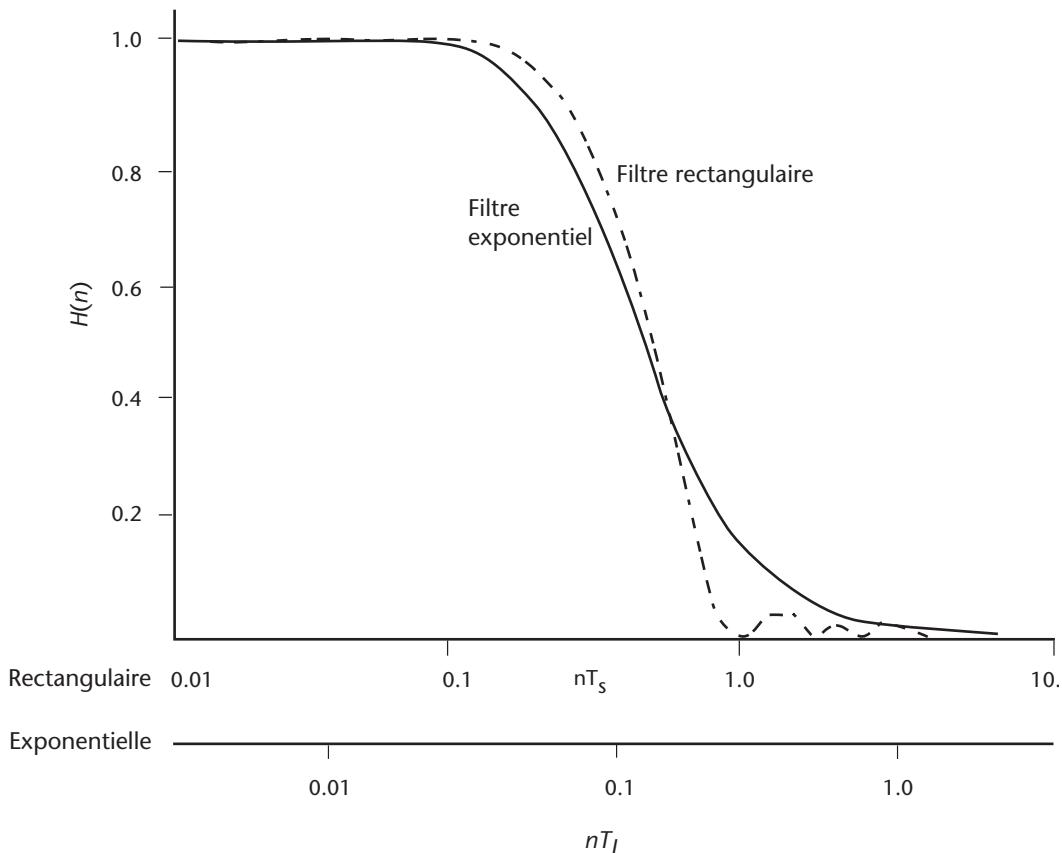


Figure 2.6. Fonctions de réponse en fréquence pour une fonction de pondération du premier ordre (exponentielle) et une fonction de pondération rectangulaire. Pour le filtre du premier ordre, la fréquence est normalisée par T_I , la constante de temps, et pour le filtre rectangulaire par T_s , la période d'échantillonnage.

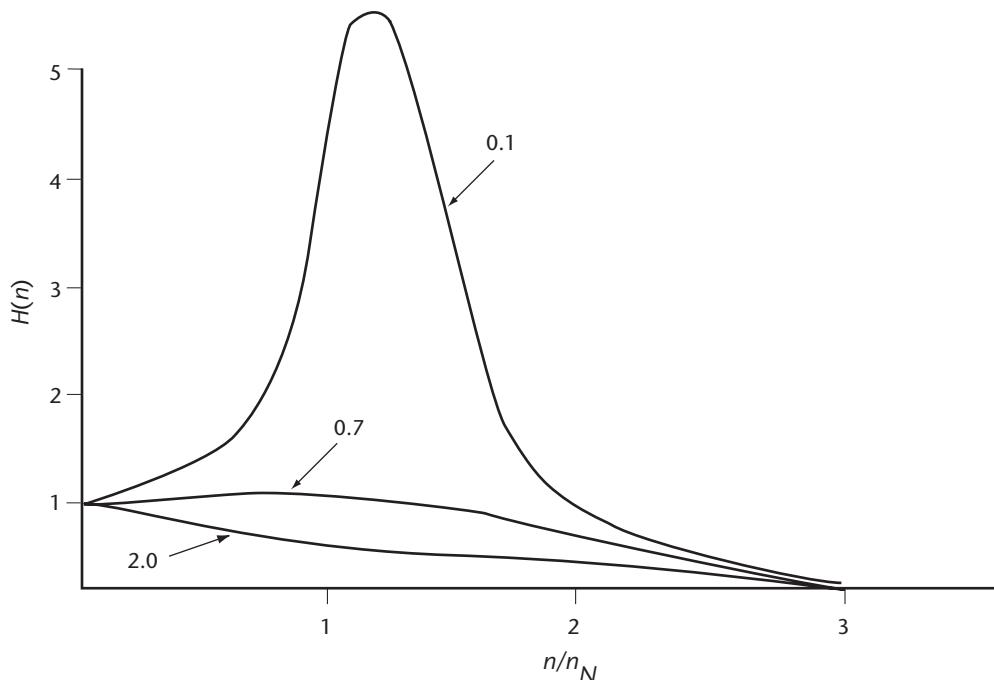


Figure 2.7. Fonctions de réponse en fréquence pour un système du deuxième ordre tel qu'une girouette. La fréquence est normalisée par n_N , la fréquence naturelle, qui dépend de la vitesse du vent. Les courbes correspondent aux facteurs d'amortissement 0,1 (très léger), 0,7 (critique, optimal pour la plupart des fins) et 2 (fort).

modifie le spectre mesuré. On notera que le filtrage ne diminue pas toujours la variance; pour un système du deuxième ordre, par exemple, la fonction de transfert amplifie en certains cas des parties du spectre et éventuellement la variance, comme dans la figure 2.7.

Pour prendre un autre exemple : quand la distribution est gaussienne, la variance constitue un paramètre utile. Si le filtrage venait à la réduire, l'utilisateur des données sous-estimerait les écarts par rapport à la moyenne d'événements survenant avec des probabilités ou des périodes de retour données.

La conception du filtre numérique peut aussi être à l'origine d'effets inattendus ou indésirables. L'examen de la figure 2.6 révèle que la fonction de réponse du filtre rectangulaire passe par une série de maxima à des fréquences au-dessus desquelles elle devient nulle, ce qui, à ces fréquences, confère une petite périodicité aux données filtrées. Dans le cas considéré, l'effet sera minime parce que les maxima sont faibles, mais certains types de filtre peuvent engendrer des maxima très importants. De manière empirique, le problème est d'autant plus grand que le nombre des coefficients de pondération est petit. On a parfois attribué aux données des périodicités qu'elles ne possédaient que parce qu'elles avaient été filtrées.

Une question liée à la conception des filtres est la longueur de l'échantillon. Si le relevé s'étend sur une période T , aucune contribution à la variabilité des données n'est possible aux fréquences inférieures à $1/T$. On peut démontrer que la longueur finie du relevé exerce l'effet d'un filtre passe-haut. Comme les filtres passe-bas étudiés précédemment, un filtre passe-haut influe sur la signification statistique des données de sortie.

2.3 DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME

Il faut connaître les caractéristiques de filtrage d'un capteur, d'un circuit électronique ou de l'ensemble qu'ils forment pour déterminer la fréquence d'échantillonnage convenant à la série chronologique produite par le système. La démarche consiste à mesurer la fonction de transfert ou de réponse $H(n)$ dans l'équation 2.8.

La fonction de transfert s'obtient d'au moins trois façons: la mesure directe, le calcul, l'estimation.

2.3.1 Mesure directe de la réponse

La réponse peut se mesurer directement par au moins deux méthodes. Premièrement: appliquer un

changement connu, d'un échelon par exemple, au capteur ou au filtre et mesurer leur réponse temporelle; il est dès lors possible de calculer $H(n)$. Deuxièmement: comparer la sortie du capteur à celle d'un autre beaucoup plus rapide. La première méthode est plus utilisée que la seconde.

La mesure de la constante de distance d'un anémomètre à coupelles ou à pales fournit un exemple simple de la façon de déterminer la réponse d'un capteur à une entrée connue, laquelle est en l'occurrence une variation d'un échelon. On place l'anémomètre, en l'empêchant de tourner, dans un flux d'air animé d'une vitesse constante, puis on le libère et on enregistre son signal de sortie; le temps qu'il met à passer de zéro à 63 pour cent de la vitesse finale ou d'équilibre dans le flux d'air s'appelle la «constante» de temps (section 2.2.3).

Si l'on dispose d'un autre capteur qui réagit bien plus rapidement que celui dont on veut déterminer la réponse, on peut mesurer et comparer les entrées et sorties des deux instruments de manière à obtenir une bonne approximation. L'outil le plus commode à cette fin est sans doute un analyseur de spectre numérique moderne à deux canaux. On envoie dans l'un des canaux la sortie du capteur rapide, dans l'autre celle du capteur plus lent, et la fonction de transfert s'affiche automatiquement. Cette dernière décrit directement l'action du capteur en tant que filtre. Si le dispositif dont on veut étudier la réponse est un circuit électronique, il est plus facile de produire un signal d'entrée connu ou même véritablement aléatoire que de trouver un capteur bien plus rapide. Là encore, un analyseur de spectre numérique moderne à deux canaux est probablement l'outil le plus commode, mais d'autres instruments de vérification électroniques sont aussi utilisables.

2.3.2 Calcul de la réponse

Il s'agit de la démarche exposée dans la section 2.2.3. Dès lors qu'on en sait suffisamment sur la physique d'un capteur et/ou d'un filtre, on peut en déterminer soit analytiquement, soit numériquement la réponse à une large gamme d'entrées. Il est possible de calculer et la réponse à des entrées spécifiques, telles qu'une variation d'un échelon, et la fonction de transfert. Si le capteur ou le circuit est linéaire (décris par une équation différentielle linéaire), la fonction de transfert fournit tous les renseignements nécessaires car elle rend compte des réponses en amplitude et en phase en tant que fonction de la fréquence, autrement dit en tant que filtre. Il n'est pas toujours pratique de considérer la réponse comme une fonction de la fréquence, mais la fonction de transfert a son équivalent en transformée de Fourier: la réponse impulsionnelle, qui rend l'interprétation

de la réponse comme fonction de temps plus aisée. Celle-ci est illustrée par les figures 2.3 et 2.4.

Quand elles sont possibles, les solutions analytiques sont préférables parce qu'elles révèlent nettement la dépendance à l'égard des différents paramètres.

2.3.3 Estimation de la réponse

Lorsqu'on connaît la fonction de réponse d'un transducteur et de tous les circuits aval, leur produit est la fonction de transfert du système tout entier. Si, comme c'est généralement le cas, les fonctions de transfert sont des filtres passe-bas, leur cumul constitue un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est inférieure à celle de n'importe lequel des filtres pris isolément.

Si l'une des fréquences de coupure prise isolément est très inférieure à n'importe laquelle des autres, celle de l'ensemble n'est que légèrement moindre.

La fréquence de coupure d'un filtre passe-bas est approximativement inverse de sa constante de temps; il en résulte que si l'une des constantes de temps prises isolément est très supérieure à n'importe laquelle des autres, la constante de temps de l'ensemble n'est que légèrement plus grande.

2.4 ÉCHANTILLONNAGE

2.4.1 Techniques d'échantillonnage

La figure 2.8 représente schématiquement un capteur classique et son circuit d'échantillonnage. Quand on expose le système à l'atmosphère, une variable atmosphérique comme la température, la pression; la vitesse ou la direction du vent, ou l'humidité agit sur le transducteur qui la convertit en un signal utile, ordinairement électrique. Les circuits de conditionnement du signal effectuent des opérations aboutissant à transformer la sortie du transducteur en tension électrique, à l'amplifier, la linéariser, la pondérer et la lisser. Le filtre passe-bas confère à la sortie du capteur sa forme définitive d'entrée dans l'échantilleur-bloqueur. Celui-ci et le convertisseur analogique-numérique produisent les échantillons à partir desquels l'observation va être calculée dans le processeur.

Il convient de noter que c'est un filtre passe-bas qui assure le lissage opéré pour des raisons techniques durant la phase de traitement du signal, en vue d'éliminer les pointes et de stabiliser l'électronique; il réduit le temps de réponse du capteur et supprime des hautes fréquences qui pourraient présenter de

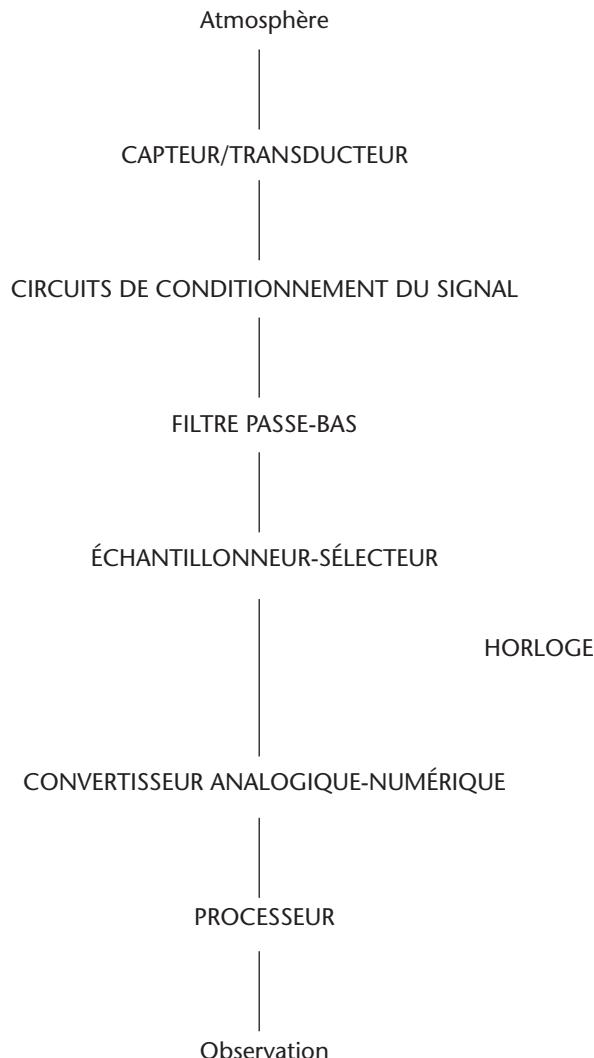


Figure 2.8. Système d'instruments

l'intérêt. Il faut donc que le concepteur et l'usager soient bien avertis de ses effets et que sa fréquence de coupure soit la plus élevée possible.

Des capteurs dits «intelligents», car ils sont couplés à un microprocesseur, peuvent effectuer eux-mêmes toutes les opérations susmentionnées. Le circuit de conditionnement du signal est parfois combiné avec d'autres circuits et tous les capteurs n'en sont pas munis. S'agissant d'instruments comme les anémomètres à coupelles ou à pales, il est parfois commode de ne parler que d'un capteur parce qu'il s'avère malaisé de distinguer le transducteur. Dans les rares cas où la sortie du transducteur ou du capteur est un signal dont la fréquence varie avec la variable atmosphérique mesurée, l'échantillonneur-bloqueur et le convertisseur analogique-numérique peuvent être remplacés par un compteur. Mais ce sont là des détails secondaires. L'important dans la conception du système est de garantir que la séquence d'échan-

tillons représente convenablement les modifications significatives de la variable atmosphérique mesurée.

La première condition à laquelle doivent satisfaire les systèmes schématisés dans la figure 2.8 est que le capteur réagisse assez rapidement pour suivre les fluctuations atmosphériques dont l'observation doit rendre compte. Cette exigence est peu contraignante pour obtenir une valeur moyenne sur 1, 2 ou 10 minutes ; il faut par contre choisir le capteur avec le plus grand soin lorsqu'il s'agit d'un aspect de la turbulence tel que la vitesse de pointe des rafales.

La seconde condition est que l'échantillonneur-bloqueur et le convertisseur analogique-numérique fournissent assez d'échantillons pour que l'observation soit bonne. C'est habituellement le capteur qui constitue le facteur limitant pour l'exactitude, et non pas la technique électronique d'échantillonnage. L'un et l'autre doivent cependant être bien appariés afin d'éviter le repliement du spectre. Si des raisons techniques limitent la cadence de l'échantillonnage, il faut que l'ensemble capteur-filtre soit conçu de manière à éliminer les fréquences qui ne peuvent être représentées.

Lorsque la fonction de réponse du capteur est appropriée, on peut se passer du filtre passe-bas, le prévoir uniquement à titre de précaution, ou encore l'inclure dans le système parce qu'il améliore la qualité du signal parvenant à l'échantillonneur-bloqueur. On s'en servira notamment en vue de supprimer le captage de bruit au bout d'un long câble ou d'accentuer le lissage de la sortie du capteur. Ce circuit doit évidemment réagir lui aussi assez vite pour suivre les fluctuations atmosphériques qu'on veut mesurer.

2.4.2 Cadences d'échantillonnage

Pour la plupart des applications météorologiques et climatologiques, les observations sont demandées à des intervalles allant de 30 minutes à 24 heures et la période d'échantillonnage est pour chacune d'elles de l'ordre de 1 à 10 minutes. On trouvera dans l'Annexe 1.B au chapitre 1 de la Partie I un état récent des exigences en la matière.

La pratique habituelle pour les observations courantes consiste à faire une lecture ponctuelle du capteur (un thermomètre, par exemple) en escomptant que la constante de temps de l'instrument garantira une période d'échantillonnage à peu près convenable. Ceci revient à se servir d'un filtre exponentiel (figure 2.6). Les stations météorologiques automatiques sont en principe dotées de capteurs plus rapides et il faut collecter et traiter plusieurs lectures ponctuelles pour obtenir une moyenne ordinaire (filtre rectangle) ou dûment pondérée.

Il a été recommandé de respecter les règles suivantes en ce qui regarde les cadences d'échantillonnage¹ :

- a) Les échantillons prélevés pour calculer les moyennes devraient être recueillis à des intervalles réguliers qui :
 - 1) ne soient pas supérieurs à la constante de temps du capteur ; ou
 - 2) ne soient pas supérieurs à la constante de temps d'un filtre analogique passe-bas placé après la sortie d'un capteur à réponse linéaire rapide ; ou
 - 3) soient suffisamment nombreux pour que l'incertitude entachant leur moyenne soit ramenée à un niveau acceptable, par exemple plus petit que celui correspondant à l'exactitude requise pour la moyenne de la variable ;
- b) Les échantillons destinés à l'estimation de fluctuations extrêmes, les rafales de vent par exemple, devraient être prélevés à des intervalles au moins quatre fois plus fréquents que ceux prévus aux alinéas 1) ou 2) ci-dessus.

Pour l'obtention des moyennes, il est souvent préconisé de recourir à des fréquences d'échantillonnage plus denses que celles indiquées en 1) et 2) ci-dessus, par exemple deux fois par constante de temps.

Les critères 1) et 2) découlent de la fréquence de Nyquist. Si l'espacement des échantillons $\Delta t \leq T_p$, la fréquence d'échantillonnage $n \geq 1/T_p$ et $nT_p \geq 1$. La courbe exponentielle de la figure 2.6 montre que ceci supprime les plus hautes fréquences et évite le repliement du spectre. Si $\Delta t = T_p$, alors $n_y = 1/2T_p$ et le biais de l'analyse des données ne sera dû qu'à l'énergie spectrale aux fréquences de $nT_p = 2$ et plus, c'est-à-dire là où les périodes des fluctuations n'atteindront pas $0,5T_p$.

Les critères 1) et 2) sont utilisés pour l'échantillonnage automatique. Le critère statistique 3) s'applique mieux aux cadences d'échantillonnage beaucoup plus faibles des observations manuelles. L'incertitude de la moyenne est inversement proportionnelle à la racine carrée du nombre d'observations et on peut la déterminer à partir des caractéristiques statistiques de la grandeur mesurée.

Le critère b) met en évidence le fait que la mesure des rafales requiert des fréquences d'échantillonnage élevées ou, plus précisément, des constantes de temps courtes. La réponse de l'instrument lisse les rafales enregistrées et la valeur maximale de ces dernières sera moyennée sur une période excédant de plusieurs fois la constante de temps.

Une manière très simple de se rendre compte des effets de repliement du spectre sur les estimations de la moyenne consiste à considérer ce qui se passe quand la fréquence de l'onde mesurée est identique à la fréquence d'échantillonnage ou un multiple de celle-ci. La moyenne déduite dépend alors de la répartition des échantillons dans le temps: un échantillon prélevé à heure fixe une fois par jour ne donnera pas une bonne estimation de la température mensuelle moyenne.

Pour illustrer l'importance des repliements dans une situation un peu plus complexe, prenons une série chronologique d'observations de la température exécutées à des intervalles de 3 heures avec un thermomètre ordinaire. Si la température évolue progressivement, comme elle le fait généralement, la moyenne journalière calculée à partir de huit échantillons présente une stabilité acceptable. En revanche, si un phénomène de moyenne échelle (un orage) a refroidi fortement l'atmosphère pendant 30 minutes, la moyenne ainsi calculée est fausse. La fiabilité des moyennes journalières dépend de la valeur du spectre à l'échelle moyenne et aux fréquences élevées, généralement faible. Cependant la survenue d'un phénomène de plus haute fréquence (l'orage) crée un problème de repliement sur les données, affectant ainsi le calcul de la moyenne, de l'écart type et d'autres mesures de la dispersion, et du spectre.

La question de la cadence d'échantillonnage peut aussi s'envisager dans le contexte de la figure 2.8. L'enseignement à retenir de la section 2.2.1 était que, pour le calcul des spectres, il fallait choisir le rythme d'échantillonnage, qui détermine la fréquence de Nyquist, de manière que le spectre des fluctuations au-dessus de cette fréquence soit trop faible pour affecter le spectre calculé. La condition est remplie si la cadence d'échantillonnage fixée par l'horloge de la figure 2.8 équivaut à au moins deux fois la plus haute fréquence d'amplitude significative dans le signal arrivant à l'échantilleur-bloqueur.

L'expression «plus haute fréquence d'amplitude significative» est vague. En donner une définition précise est difficile parce que les signaux ne sont jamais véritablement limités en largeur de bande. Il n'est en revanche pas difficile de faire en sorte que l'amplitude des fluctuations du signal décroisse rapidement avec l'augmentation de la fréquence et que l'amplitude quadratique moyenne des fluctuations au-dessus d'une fréquence donnée reste petite comparativement soit au bruit de quantification du convertisseur analogique-numérique, soit à une erreur ou un niveau de bruit acceptables dans les échantillons, ou encore fournit une contribution négligeable à la somme des erreurs ou des bruits entachant l'observation.

¹ Recommandation 3 (CIMO X) adoptée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation à sa dixième session (1989).

Nous avons examiné à la section 2.3 les caractéristiques que devaient avoir les capteurs et les circuits et les ajustements qu'il était possible de leur apporter afin que l'amplitude des fluctuations du signal diminue rapidement avec l'augmentation de la fréquence. Du fait qu'ils ne peuvent pas répondre aux fluctuations rapides de l'atmosphère (haute fréquence) mais reflètent fidèlement ses modifications lentes (basse fréquence), la plupart des transducteurs sont également des filtres passe-bas. Par définition, ces filtres limitent la largeur de bande et, en vertu du théorème de Nyquist, limitent aussi la cadence d'échantillonnage nécessaire pour reproduire fidèlement leurs sorties. Si par exemple l'atmosphère subit des variations réelles dont les périodes descendent jusqu'à 100 ms, ce théorème voudrait que la fréquence d'échantillonnage atteigne un échantillon soit $(50 \text{ ms})^{-1}$, ce qui est techniquement coûteux. Si, par ailleurs, ces variations sont vues au travers d'un capteur et d'un filtre répondant beaucoup plus lentement, par exemple avec une constante de temps de 10 s, la cadence d'échantillonnage de Nyquist tombe à un échantillon par 5 s, ce qui est bien plus facile, moins coûteux et préférable lorsqu'il n'est pas indispensable de mesurer les hautes fréquences.

2.4.3 Cadence d'échantillonnage et contrôle de qualité

L'efficacité de bon nombre des techniques de contrôle qualitatif utilisées dans les stations météorologiques automatiques repose sur la cohérence temporelle, ou persistance, des données. Imaginons par exemple deux algorithmes de contrôle de qualité des mesures barométriques transmises par des stations automatiques. Les échantillons sont prélevés toutes les 10 s, des moyennes sur 60 s sont calculées toutes les minutes et l'on suppose que la pression atmosphérique change rarement, voire jamais, de plus de 1 hPa par minute.

Le premier algorithme rejette la moyenne si elle diffère de plus de 1 hPa de la précédente. Il compromet l'exploitation des données disponibles en ne détectant pas un échantillon qui, entaché d'une erreur atteignant jusqu'à 6 hPa, introduit dans l'observation une erreur de 1 hPa.

Le second algorithme rejette tout échantillon qui diffère de plus de 1 hPa du précédent. La moyenne en ce cas ne contient pas d'erreur supérieure à environ 0,16 (1/6) hPa. De plus, si l'hypothèse est vraie que la pression atmosphérique change rarement de plus de 1 hPa par minute, on peut ramener à 0,16 hPa le seuil d'acceptation/rejet d'échantillons contigus et restreindre ainsi encore plus l'erreur affectant la moyenne.

L'enseignement à tirer de cet exemple est que les procédures de contrôle qualité fondés sur la consistance temporelle (corrélation) des données sont d'autant plus efficaces que la résolution temporelle (cadence d'échantillonnage) de ces dernières est forte. À l'extrémité haute fréquence du spectre du signal de sortie de l'ensemble capteur/ filtre, la corrélation entre les échantillons contigus augmente avec la cadence d'échantillonnage, puis cesse de croître à partir du moment où la fréquence de Nyquist est atteinte.

Aucun argument n'a jusqu'ici été avancé qui dissuaderait d'utiliser un capteur/filtre dont la constante de temps serait aussi longue que la période d'établissement de la moyenne requise pour l'observation et de cantonner cette dernière à un seul échantillon. Agir ainsi imposerait certes une charge minimale au sous-système numérique mais irait à l'encontre du contrôle qualitatif des données. Les observations peuvent en effet se répartir en trois catégories, comme suit :

- Les observations exactes (erreurs inférieures ou égales à une valeur spécifiée) ;
- Les observations inexactes (erreurs supérieures à une valeur spécifiée) ;
- Les observations manquantes.

Le contrôle de qualité vise à réduire le nombre à la fois des observations inexactes et manquantes. Il faut pour cela calculer chaque observation à partir d'un nombre suffisamment grand d'échantillons de qualité contrôlée. On peut ainsi isoler et éliminer les graves erreurs apparentes et poursuivre le calcul sans qu'il soit contaminé par l'échantillon douteux.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Acheson, D. T., 1968 : An approximation to arithmetic averaging for meteorological variables. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 7, p. 548-553.
- Bendat, J. S. et A. G. Piersol, 1986 : *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*. Deuxième édition. John Wiley and Sons, New York.
- Blackman, R. B. et J. W Tukey, 1958 : *The Measurement of Power Spectra*. Dover Publications, New York.
- Jenkins, G. M. et D. G. Watts, 1968 : *Spectral Analysis and its Applications*. Holden-Day, San Francisco.
- Kulhánek, O., 1976 : *Introduction to Digital Filtering in Geophysics*. Elsevier, Amsterdam.
- MacCready, P. B. et H. R. Jex, 1964 : Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 3, n° 2, p. 182-193.
- Otnes, R. K. et L. Enochson, 1978 : *Applied Time Series Analysis*. Volume 1 : Basic techniques. John Wiley and Sons, New York.
- Pasquill, F. et F. B. Smith, 1983 : *Atmospheric Diffusion*. Troisième édition. Ellis Horwood, Chichester.
- Stearns, S. D. et D. R. Hush, 1990 : *Digital Signal Analysis*. Deuxième édition. Prentice-Hall, New Jersey.

CHAPITRE 3

RÉDUCTION DES DONNÉES

3.1 GÉNÉRALITÉS

Le présent chapitre étudie dans leurs grandes lignes les procédures de traitement et/ou de conversion s'appliquant aux données directement fournies par les instruments pour les transformer en une information utile pour les utilisateurs de données météorologiques, en particulier pour les besoins des échanges entre pays. La réduction des données faisant l'objet d'un échange international est régie par les règles officielles établies par l'OMM, et l'on trouvera quelques conseils et définitions utiles au chapitre 1 de la partie I du *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544).

3.1.1 Définitions

Lorsqu'il est question des instruments qui servent à mesurer les variables atmosphériques, il est utile de s'appuyer sur une classification par niveau de données. Cette classification a été introduite au sein du Programme de recherches sur l'atmosphère globale et définie dans les publications de l'OMM (1992 ; 2003).

Les données de niveau I sont en général des relevés d'instruments exprimés en unités physiques, associées à des coordonnées géographiques. Il faut les convertir pour obtenir les valeurs des variables météorologiques usuelles (Voir chapitre 1 de la partie I). Souvent les données du niveau I sont elles-mêmes obtenues par traitement de signaux électriques, tels que des tensions, que l'on qualifie de données brutes. Il peut s'agir par exemple des valeurs de la luminance énergétique obtenues par satellite ou de celles de tensions de vapeur d'eau.

Les données qualifiées de variables météorologiques sont elles de niveau II. Elles peuvent être issues directement des instruments (notamment de divers instruments basiques) ou sont déduites des données du niveau I. À titre d'exemple, un capteur ne mesure pas la visibilité, qui est de niveau II, mais plutôt le coefficient d'extinction, qui est de niveau I.

Les données de niveau III sont celles constituées des séries de données cohérentes exprimées généralement sous forme de points de grille. Elles ne seront pas évoquées dans ce Guide.

Les données échangées à l'échelon international appartiennent aux niveaux II ou III.

3.1.2

Besoins dans le domaine de la météorologie

Les stations d'observation du monde entier produisent de façon régulière et fréquente des observations sous des formats normalisés, ce qui permet l'échange d'une information de qualité élevée obtenue par des techniques d'observation uniformisées, et ce malgré les différents types de capteurs pouvant être utilisés dans le monde, voire même au sein du pays lui-même. Ce résultat est le fruit d'un travail considérable ayant nécessité d'énormes ressources consacrées, durant de nombreuses années, à la normalisation du contenu, de la qualité et du format des données. L'automatisation de l'observation de l'atmosphère allant en augmentant, il est important de continuer ce travail de normalisation et d'établir des normes complémentaires pour convertir les données brutes en données de niveau I, ou les données brutes et de niveau I en données de niveau II.

3.1.3

Processus de réduction des données

Le rôle du transducteur est de convertir la mesure d'une variable atmosphérique en un signal quantitatif approprié. Ils peuvent cependant être sensibles au milieu dans lequel ils sont utilisés, ce qui nécessite par exemple une variation de l'étalonnage suivant la température d'utilisation. De plus, les valeurs qu'ils fournissent comportent diverses erreurs dues notamment à des phénomènes tels les dérives et les bruits. Une fois qu'un système d'acquisition de données a exécuté l'échantillonnage qui convient, il y a lieu de réduire le signal de sortie et de le linéariser en fonction de l'étalonnage de l'ensemble du système, puis de le filtrer ou de calculer une moyenne. À ce stade, voire même avant celui-ci, le signal devient une donnée brute. Il faut alors convertir la donnée en valeur de la grandeur physique que mesure le capteur, soit une donnée de niveau I, voire une donnée de niveau II lorsqu'elle ne nécessite plus aucune conversion. Dans certains cas des traitements supplémentaires sont réalisés. À différentes étapes du processus, les données peuvent être affectées d'une correction pour éliminer les effets externes, tels ceux dus à l'exposition du capteur; elles peuvent aussi faire l'objet d'un contrôle de qualité.

Les données provenant des stations météorologiques classiques ou automatiques subissent ainsi de

nombreux traitements avant que l'on puisse les utiliser. L'ensemble du processus s'appelle la réduction des données. Il consiste en l'exécution de plusieurs fonctions comprenant tout ou partie des opérations suivantes :

- a) Le transducteur transforme la grandeur physique mesurée en variable atmosphérique ;
- b) Les signaux de sortie du transducteur sont mis en forme ;
- c) Les données sont recueillies et échantillonées ;
- d) Les corrections d'étalonnage sont appliquées ;
- e) Les signaux de sortie des transducteurs sont linéarisés ;
- f) Les données statistiques, telles que des moyennes, sont extraites ;
- g) Les variables connexes sont dérivées ;
- h) Les corrections sont appliquées ;
- i) La qualité des données est contrôlée ;
- j) Les données sont enregistrées et archivées ;
- k) Les métadonnées sont rassemblées ;
- l) Les messages sont mis en forme ;
- m) Le contenu des messages est vérifié ;
- n) Les messages sont transmis.

Ces fonctions sont citées dans un ordre séquentiel approximatif. Toutefois, la première et la dernière doivent dans tous les cas demeurer dans ces positions. Pour ce qui est de la linéarisation, le transducteur peut lui-même l'exécuter ou elle est assurée à la sortie de l'appareil, mais elle doit précéder l'extraction d'une moyenne. Le contrôle de qualité et l'application de corrections peuvent intervenir à différents stades du processus de réduction des données. Suivant les applications, les stations peuvent fonctionner à capacité réduite, sans intégrer par conséquent toutes ces fonctions.

Les fonctions du processus de réduction des données qui importent dans le contexte du présent Guide sont le choix de procédures d'échantillonnage appropriées, l'application de corrections d'étalonnage, la linéarisation le cas échéant, le filtrage et/ou le calcul de moyennes, la dérivation de variables connexes, l'application de corrections, le contrôle de qualité et la collecte des métadonnées. Elles constituent le sujet du présent chapitre. Des détails plus explicites sur la gestion de la qualité sont fournis dans le chapitre 1, partie III et sur l'échantillonnage, le filtrage et le calcul de moyennes dans le chapitre 2, partie III.

Une fois réduites pour les mettre à la disposition des utilisateurs, il faut coder les données, les transmettre et les recevoir, les afficher sur écran et aussi les archiver. Ces opérations sont examinées dans d'autres Manuels et Guides de l'OMM. Un système d'observation n'est complet que lors-

qu'il est relié à d'autres systèmes qui acheminent les données jusqu'aux utilisateurs. Dans cet enchaînement de systèmes, la qualité des données est déterminée par le maillon le plus faible. Il convient donc d'exécuter un contrôle de qualité à chaque étape.

Dans leur majeure partie, la technologie actuelle et les techniques manuelles normalisées pour la réduction des données peuvent être adaptées aux stations météorologiques automatiques, auxquelles s'appliquent cependant des exigences particulières. Les stations météorologiques automatiques effectuent des mesures à l'aide de différents capteurs, y appliquent des calculs normalisés pour dériver les éléments des messages et mettent également en forme ces messages. Selon les types de capteurs, il peut s'avérer difficile de mettre au point une interface avec le matériel automatique. Il faut alors redéfinir les expressions analytiques que renferment les tables de calcul ou encore en découvrir de nouvelles. Il faut aussi transcrire les règles de chiffrage des messages en langage informatique comprenant divers degrés d'exactitude, de complétude et de cohérence que n'exigent pas les instructions en langage naturel s'adressant aux observateurs. En outre l'automatisation de certaines mesures, telles que l'identification des types de nuages, apparaît impossible dans un avenir prévisible.

Le chapitre 1, partie II du présent Guide, propose une description des logiciels d'acquisition et de traitement des données qu'utilisent les stations météorologiques automatiques à la fois relativement précise et suffisamment générale pour qu'elle puisse se rapporter à l'ensemble des applications des transducteurs électriques en météorologie. Dans le Rapport N° 19 de la série consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation (OMM/TD-N° 230), Acheson présente quelques principes généraux ainsi que des exemples précis relatifs à l'élaboration d'algorithmes destinés aux stations météorologiques automatiques synoptiques.

Pour le traitement des données météorologiques, il existe en général une bonne procédure ou méthode ou un bon algorithme, mais il peut y avoir de nombreuses approximations plus ou moins utiles. La pratique tend à prouver que la bonne méthode est celle qui donne les meilleurs résultats à long terme. C'est une méthode directe, comportant peu de restrictions et qui, une fois mise en œuvre, ne nécessite plus aucune attention. Dans les paragraphes qui suivent, on se limitera donc surtout à examiner la seule bonne méthode, à condition que le problème étudié admette des solutions exactes.

3.2

ÉCHANTILLONNAGE

La question de l'échantillonnage est examinée en détail chapitre 2, partie III. Voici un résumé des points principaux.

Il y a lieu de constater que les variables atmosphériques fluctuent rapidement et de façon aléatoire en raison du phénomène permanent de turbulence et que les transducteurs ne reproduisent pas fidèlement les variables compte tenu de l'imperfection de leurs caractéristiques dynamiques, telles que la capacité restreinte de répondre aux changements rapides. Il faut généralement associer aux transducteurs du matériel capable d'amplifier ou de protéger les signaux de sortie, voire de convertir un type de signal en un autre, comme une résistance en tension par exemple. Les circuits utilisés à ces fins peuvent aussi lisser les signaux ou les filtrer à l'aide d'un filtre passe-bas. L'appareillage est doté aussi d'une fréquence de coupure au-dessus de laquelle les fluctuations significatives ne se produisent pas, car elles n'existent pas dans l'atmosphère et/ou le transducteur ou le conditionneur de signal les élimine.

L'une des questions importantes à régler dans la conception des appareils touche la fréquence d'échantillonnage du signal de sortie du transducteur. À cette question, on peut apporter la réponse suivante : une fréquence régulière, égale au moins au double de la fréquence de coupure du signal de sortie du transducteur. Toutefois, il suffit d'appliquer habituellement une règle équivalente plus simple : la période d'échantillonnage ne doit pas dépasser la plus grande des constantes de temps de tous les composants et circuits intervenant avant le système d'acquisition. Lorsque la fréquence d'échantillonnage est inférieure au double de la fréquence de coupure, des erreurs inutiles se produisent dans la variance des données et dans toutes les grandeurs et valeurs statistiques dérivées. Dans certains cas, une telle augmentation de la variance peut être acceptable, mais pas toujours. Un bon échantillonnage doit toujours assurer une variance minimale.

Pour qu'un transducteur soit bien conçu, il peut falloir l'équiper d'un filtre passe-bas et le doter d'une constante de temps à peu près égale à la période d'échantillonnage du Système d'acquisition de données. À titre de précaution, il convient aussi de minimiser les effets des bruits, en particulier ceux correspondant à la fréquence du réseau électrique, à savoir 50 ou 60 Hz, qui proviennent des câbles de raccordement entre les capteurs et les processeurs ainsi que des pertes à l'alimentation.

3.3

APPLICATION DES FONCTIONS D'ÉTALONNAGE

Selon les règles du Manuel du Système mondial d'observation (OMM-N°544), les stations seront équipées d'instruments convenablement étalonnés, utilisant des méthodes d'observation et de mesure adéquates, de manière que l'exactitude des mesures et observations satisfasse les exigences de la météorologie. Pour convertir les données brutes en variables météorologiques, il faut y appliquer des fonctions d'étalonnage. Pour obtenir des mesures dont l'exactitude corresponde aux exigences établies, il est essentiel d'y appliquer comme il convient les fonctions d'étalonnage et toutes autres corrections systématiques.

Il convient de déterminer les fonctions d'étalonnage à partir des données d'étalonnage de toutes les composantes intervenant dans la chaîne de mesure. En principe au moins, et dans la pratique pour quelques grandeurs météorologiques, telle la pression, il faudrait pouvoir raccorder les instruments de terrain à un étalon international, et ce par une chaîne ininterrompue de comparaisons entre l'instrument de terrain et certains étalons ou toute une série d'étalons, tels qu'un étalon voyageur, un étalon de travail, un étalon de référence et un étalon national (voir chapitre 1, partie I).

Les procédures d'étalonnage et les corrections systématiques s'appliquant aux différents paramètres météorologiques fondamentaux sont décrites dans les chapitres correspondants de la partie I.

Il est indispensable qu'un expert étalonne régulièrement les instruments de terrain et apporte les révisions correspondantes aux fonctions d'étalonnage. Il ne suffit donc pas d'utiliser les données d'étalonnage fournies avec le matériel prévu à cet effet. Tout d'abord, il est souvent impossible de raccorder les étalons utilisés par le fabricant à un étalon national et, de toute façon, il y a lieu de prévoir que l'étalonnage de l'instrument subira des changements durant le transport, le stockage et l'exploitation. Il convient d'enregistrer les modifications d'étalonnage dans les fichiers de métadonnées de la station.

3.4

LINÉARISATION

Lorsque le signal de sortie du transducteur n'est pas exactement proportionnel à la quantité mesurée, il y a lieu de linéariser ce signal, compte tenu de l'étalonnage de l'instrument. La linéarisation doit intervenir avant le filtrage du signal ou le calcul d'une moyenne. En effet, lorsque le signal n'est pas

constant tout au long de la période de calcul d'une moyenne, les résultats obtenus sont différents suivant que la linéarisation intervienne avant ou après le calcul de la moyenne.

On distingue trois types de non linéarité (OMM/TD-N° 230) :

- a) Une non linéarité intrinsèque. Les signaux de sortie de nombreux transducteurs ne sont pas proportionnels à la variable atmosphérique mesurée ; une thermistance en est un exemple simple ;
- b) Une non linéarité associée à la relation entre la variable mesurée et la variable atmosphérique que l'on cherche à obtenir, le capteur pouvant être constitué néanmoins de transducteurs linéaires. À titre d'exemple, bien que le photodétecteur et le convertisseur d'angle d'un cœlomètre à faisceau rotatif soient des appareils linéaires, la relation entre le signal de sortie du cœlomètre (intensité lumineuse rétrodiffusée en fonction d'un angle donné) et la hauteur des nuages n'est pas linéaire ;
- c) Une non linéarité associée à la conversion des données de niveau I en données de niveau II. À titre d'exemple, pour établir des estimations de la visibilité moyenne, le calcul s'effectue à partir du coefficient d'atténuation et non pas de la visibilité ni du facteur de transmission.

Dans le premier de ces cas, la fonction d'étalonnage utilisée est souvent un polynôme. Il est alors fortement souhaitable de disposer de capteurs normalisés auxquels s'appliquent des coefficients d'étalonnage uniformes afin d'éviter les problèmes que soulève le remplacement des capteurs sur le terrain. Dans les deux autres cas, il s'agit le plus souvent d'une fonction analytique qui décrit le fonctionnement du transducteur en fonction des conditions.

3.5

CALCUL DE MOYENNES

Compte tenu de la variabilité naturelle de l'atmosphère à petite échelle, il est indispensable de lisser les valeurs obtenues ou de calculer des moyennes si l'on veut obtenir des observations représentatives et veiller à la compatibilité entre les différents instruments. Pour les besoins de l'échange international et pour ceux de nombreuses applications à caractère opérationnel, il faut fournir une mesure du vent représentative des deux ou dix minutes qui précèdent l'heure d'observation, cette période variant, par convention, entre une et dix minutes pour les autres grandeurs. La pratique de l'observation sur une minute découle en partie du fait que certains capteurs météorologiques

classiques ont un temps de réponse de l'ordre de la minute et qu'un relevé correspond théoriquement à une valeur moyenne lissée sur une minute. Lorsque le temps de réponse de l'instrument est beaucoup plus bref, il faut alors échantillonner les valeurs puis les filtrer ou calculer une moyenne. C'est là le sujet du chapitre 2 de la présente partie. Le lecteur se reporterà également au chapitre 1 de la partie I (annexe 1.B) dans lequel figure les conventions et les périodes types pour le calcul des moyennes qui s'appliquent aux systèmes d'instruments météorologiques utilisés en conditions d'exploitation.

On utilise en général deux types de lissage ou de calcul d'une moyenne, l'un arithmétique, l'autre exponentiel. La moyenne arithmétique est conforme à la notion normale de moyenne et facilement appliquée aux instruments numériques: c'est le cas du filtre d'impulsions longues décrit dans le chapitre 2. La moyenne exponentielle correspond au signal de sortie du filtre passe-bas le plus simple, qui représente la réponse la plus simple d'un capteur aux fluctuations de l'atmosphère. Elle est plus facile à appliquer dans un circuit analogique que la moyenne arithmétique. Lorsque la constante de temps d'un filtre simple correspond approximativement à la moitié de la période d'échantillonnage utilisée pour le calcul d'une moyenne, il est alors impossible dans la pratique d'établir une distinction entre les valeurs qui ont subi un lissage arithmétique et celles ayant subi un lissage exponentiel (voir le chapitre 2, partie III et Acheson, 1968).

Dans le cas des capteurs à réponse rapide, les signaux de sortie variant rapidement, les fréquences d'échantillonnage doivent être élevées pour que l'on puisse obtenir des moyennes optimales (comportant une incertitude minimale). Pour réduire la fréquence d'échantillonnage tout en conservant une moyenne numérique optimale, il serait possible de linéariser le signal de sortie du transducteur (s'il y a lieu), d'y appliquer un lissage exponentiel à l'aide d'un circuit analogique de constante de temps t_c puis d'exécuter un échantillonnage numérique à intervalles de temps t_c .

De nombreux autres types de filtres complexes, élaborés à partir de calculs numériques ont été utilisés pour les besoins d'applications spéciales.

Le calcul d'une moyenne appliquée à des variables non linéaires entraîne des problèmes lorsque les variables varient durant la période de calcul. Il importe donc de bien choisir la variable linéaire qui servira au calcul de la moyenne. Le tableau ci-dessous fournit quelques exemples précis d'éléments

d'une observation synoptique dont les relevés sont des moyennes, ainsi que les variables linéaires correspondantes qu'il convient d'utiliser pour le calcul de ces moyennes.

3.6 VARIABLES ET STATISTIQUES

Outre les moyennes, il faut aussi déterminer des valeurs extrêmes et d'autres variables représentatives de périodes bien définies, en fonction de l'objectif des observations. Les mesures de rafales de vent par exemple nécessite une fréquence d'échantillonnage particulièrement élevée.

D'autres variables peuvent être aussi calculées à partir de ces moyennes, telles que la pression moyenne au niveau de la mer, la visibilité et le point de rosée. Dans les stations manuelles conventionnelles, on utilise des tables de conversion. Normalement les stations météorologiques automatiques intègrent ces tables ainsi que des programmes d'interpolation ou les formules de base ou des approximations de ces formules. Le lecteur se reportera aux divers chapitres de la partie I quant aux différentes pratiques de conversion des données et au chapitre 1 de la partie II pour les stations météorologiques automatiques.

Grandeur calculée à partir de valeurs moyennes

Grandeur calculée	Grandeur moyennée utilisée
Vitesse et direction du vent	Composantes cartésiennes
Point de rosée	Humidité absolue
Visibilité	Coefficient d'extinction

3.7 CORRECTIONS

La mesure de nombreuses variables météorologiques subissant divers effets, il convient d'y appliquer des corrections soit au stade des données brutes, soit à celui des données de niveau I ou de niveau II. Ces corrections sont décrites dans les chapitres de la partie I qui traitent des différentes variables météorologiques. Les corrections s'appliquant aux données brutes, erreur de zéro ou d'index, ou erreur de température, de pesanteur, etc., sont obtenues à partir des caractéristiques techniques et de l'étalonnage de l'instrument. Il y a lieu d'apporter aussi d'autres types de corrections et d'ajustements aux données brutes ou aux données de niveaux supérieurs. Il peut s'agir de lissage, tel celui qu'il convient d'appliquer aux mesures de la hauteur des nuages et aux profils atmosphériques en altitude. On peut aussi appliquer des corrections d'exposi-

tion, notamment aux observations de la température, de vent et de précipitations. Les algorithmes qui correspondent à ces types de corrections découlent parfois d'études dont les résultats ne sont pas complètement définitifs. Par conséquent, bien qu'à n'en pas douter, ces algorithmes améliorent l'exactitude des données, il est néanmoins possible qu'ils soient remplacés à l'avenir par d'autres algorithmes. Il faudra alors pouvoir remonter jusqu'aux données originales brutes, sans correction. Aussi est-il recommandé de bien documenter ces algorithmes.

3.8 GESTION DE LA QUALITÉ

La gestion de la qualité est traitée dans le Chapitre 1, Partie III. Les exigences officielles sont précisées dans le Manuel du Système mondial d'observation (OMM-N°544, 2003) et les procédures générales sont décrites dans le Guide du Système mondial de traitement des données et de prévision (OMM-N°488, 1989).

Il convient de contrôler la qualité des données à chacune des étapes de la conversion du signal de sortie brut du capteur en une variable météorologique. Cela comprend les traitements impliqués dans l'acquisition des données, comme ceux de réduction en données de niveau II.

Au moment de l'acquisition des données, on s'attachera à éliminer non seulement des erreurs de mesure systématiques ou aléatoires, comme celles issues d'un écart par rapport aux normes techniques, celles dues à une mauvaise mise en place des instruments ou même les erreurs subjectives commises par les observateurs.

Au moment de la réduction et de la conversion des données, on cherchera à éliminer les erreurs découlant des méthodes de conversion utilisées ou des algorithmes de traitement associés à ces méthodes. Afin d'améliorer la qualité des données obtenues par un échantillonnage de fréquence élevée, ce qui peut engendrer davantage de bruits, on fera appel à des méthodes de filtrage et lissage. Ces dernières sont décrites plus haut dans le présent chapitre ainsi que dans le Chapitre 2, Partie III.

3.9 COLLECTE DES MÉTADONNÉES

Les métadonnées sont traitées dans le Chapitre 1, Partie I, dans le Chapitre 1, Partie III, et dans d'autres chapitres relatifs aux différentes grandeurs météoro-

logiques. Les métadonnées doivent être conservées pour les raisons qui suivent :

- a) Les données originales peuvent ainsi être retraitées, si nécessaire (en y appliquant un filtrage ou des corrections différentes par exemple) ;
- b) L'utilisateur peut ainsi facilement connaître la qualité des données et les conditions dans lesquelles elles ont été obtenues (emplacement de l'instrument par exemple) ;

- c) Des utilisateurs éventuels peuvent ainsi être informés de l'existence de certaines données.

Il y a lieu par conséquent d'enregistrer toutes les procédures utilisées, à tous les stades de réduction des données décrits ci-dessus, et ce pour chaque type de données, mais aussi pour chaque type de station et d'observation.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Acheson, D.T., 1968 : An approximation to arithmetic averaging for meteorological variables. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 7, 4e édition, p. 548-553.
- Organisation météorologique mondiale, 1987 : *Some General Considerations and Specific Examples in the Design of Algorithms for Synoptic Automatic Weather Stations* (D.T. Acheson), Rapport N° 19 de la série de l'OMM consacrée aux instruments et aux méthodes d'observation, OMM/TD-N° 230, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1992 : *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision*, volume I, OMM-N° 485, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989 : *Guide du Système mondial d'observation*, OMM-N° 488, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2003 : *Manuel du Système mondial d'observation*, volume I : Aspects mondiaux, OMM-N° 544, Genève.

CHAPITRE 4

ESSAIS, ÉTALONNAGE ET COMPARAISONS

4.1 GÉNÉRALITÉS

L'un des buts de l'OMM, énoncé dans l'article 2(c) de la Convention de l'Organisation, est d' «encourager la normalisation des observations météorologiques et connexes et assurer la publication uniforme d'observations et de statistiques». C'est dans cette perspective qu'ont été créés des ensembles de protocoles standard et de pratiques recommandées, dont on trouvera l'essentiel dans le présent Guide.

On ne peut obtenir de données d'observations valables que si les instruments et le réseau utilisés sont soumis à un programme complet d'assurance de la qualité. L'étalonnage et les essais font partie intégrante d'un tel programme. Celui-ci comporte aussi d'autres éléments: une définition claire des prescriptions, une sélection d'instruments fondée explicitement sur ces prescriptions, les critères de sélection des sites, l'entretien et la logistique. Ces autres éléments sont à considérer lors de l'élaboration de plans d'étalonnage et d'essais. A l'échelle internationale, l'extension des programmes d'assurance de la qualité à des comparaisons a son importance pour la création de jeux de données compatibles.

En raison de l'importance de la normalisation sur le plan international, plusieurs associations régionales de l'OMM ont créé des centres régionaux d'instruments¹ chargés d'organiser et de soutenir des activités de normalisation et d'étalonnage. Le mandat et le siège de ces centres sont indiqués à l'Annexe 1.A du chapitre 1 de la Partie 1. De même, comme l'a recommandé la CMOM², on a créé un réseau de centres régionaux d'instruments maritimes chargé d'offrir des fonctions semblables en ce qui concerne la météorologie maritime et les mesures océanographiques connexes. Le mandat et l'emplacement de ces centres sont indiqués dans l'annexe 4.A du chapitre 4 de la Partie II.

¹ Selon la recommandation 19 de la Commission des instruments et des méthodes d'observation adoptée à sa neuvième session (1985).

² Selon la recommandation 1 de la Commission technique mixte OMM/COI d'océanographie et de météorologie maritime adoptée à sa troisième session (2009).

³ Le Guide pour l'expression des incertitudes de mesures ISO/IEC Guide 98:1993 a été révisé et remplacé : ISO/IEC Guide 98-3:2008.

Il existe des normes et des directives nationales et internationales pour de nombreux aspects des essais et des évaluations, qu'il convient de respecter le cas échéant. Certaines de ces normes et directives sont citées dans le présent chapitre.

4.1.1 Définitions

La définition des termes métrologiques est donnée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO, 1993)³.

Nombre de ces définitions sont présentées dans le chapitre 1 de la Partie 1 du présent Guide et certaines sont reprises ici par souci de commodité. Les définitions en question, qui ne sont pas d'un emploi universel, diffèrent par certains égards à la terminologie couramment employée dans la pratique météorologique. Cependant, il est recommandé d'utiliser les définitions de l'ISO en matière de terminologie. Le document cité de l'ISO est produit conjointement par le Bureau international des poids et mesures, par l'Organisation internationale de métrologie légale, par la Commission électrotechnique internationale et par d'autres organismes internationaux semblables.

La terminologie employée par l'ISO diffère de l'usage courant notamment aux égards suivants :

- *L'exactitude* (d'une mesure) désigne l'étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et la valeur vraie du mesurande; il s'agit d'un terme qualitatif. L'exactitude d'un instrument désigne la capacité de celui-ci à indiquer des valeurs proches de la valeur vraie; il s'agit également d'un terme qualitatif. On peut parler d'un instrument ou d'une mesure d'une grande exactitude, mais la mesure quantitative de l'exactitude est l'incertitude.

- *L'incertitude* s'exprime en fonction de la dispersion : écart type ou niveau de confiance, par exemple.

- Une *erreur* de mesure est le résultat d'un mesurage moins la valeur vraie (un écart étant de signe opposé). Il existe des erreurs aléatoires et des erreurs systématiques (on emploie couramment le terme biais pour désigner une erreur systématique).

- *La fidélité* s'exprime aussi statistiquement ; il s'agit de l'étroitesse de l'accord entre des mesures effectuées dans des conditions constantes (définies).

- *La reproductibilité* désigne l'exactitude de l'accord dans des conditions différentes définies.

L'ISO ne définit pas le terme de précision et conseille d'éviter son usage.

4.1.2 Programmes d'essais et d'étalonnage

Avant d'utiliser les mesures atmosphériques effectuées au moyen d'un capteur météorologique donné, il convient de répondre à plusieurs questions :

- Quelle est l'exactitude du capteur ou du système considéré ?
- Quelle est la variabilité des mesures dans un réseau intégrant de tels capteurs ou systèmes ?
- Quelle sera la variation ou l'erreur systématique des données produites par le capteur ou le système considéré si l'on en modifie l'emplacement géographique ?
- Quelle sera la variation ou l'erreur systématique des données si le capteur ou le système en remplace un autre qui mesure le(s) même(s) élément(s) météorologique(s) ?

Pour répondre à ces questions et garantir la validité et la pertinence des mesures produites par un capteur ou un système météorologique, il convient de procéder à un ensemble d'étalonnages, d'essais en laboratoire et d'essais de fonctionnement.

Les programmes d'étalonnage et d'essai devraient être réalisés et normalisés selon la variabilité climatique attendue et selon les perturbations d'ambiance et électromagnétiques que sont censés subir les capteurs ou systèmes considérés. Les facteurs à envisager sont par exemple les plages de température, d'humidité et de vitesse du vent attendues, le fait que le capteur ou système fonctionne ou non dans un milieu marin ou dans un milieu caractérisé par le soulèvement de poussière ou de sable, la variation attendue de la tension et de la phase, les transitoires électriques des signaux et du secteur et les parasites électromagnétiques moyens et maximaux attendus. Les Services météorologiques peuvent acheter des services d'étalonnage et d'essai à des laboratoires ou entreprises privés ou créer des organismes d'essai chargés d'assurer de tels services.

Il est important de soumettre au moins deux capteurs ou systèmes semblables à l'ensemble des essais d'un programme d'essai donné. Il sera ainsi possible de déterminer la variabilité attendue des capteurs ou des systèmes et de déceler les problèmes plus facilement.

4.2

ESSAIS

4.2.1

Objet des essais

L'essai de capteurs et de systèmes a pour objet d'obtenir des renseignements sur leurs performances dans des conditions définies d'utilisation. En général, les constructeurs testent leurs capteurs et leurs systèmes. Dans certains cas, ils en publient les caractéristiques de fonctionnement en se fondant sur les résultats de leurs essais. Cependant, il est très important que les Services météorologiques utilisateurs créent et mettent en œuvre leur propre programme d'essais ou fassent appel à un service d'essai indépendant.

On peut subdiviser les essais en essais d'ambiance, essais en environnement électrique et en cas de parasites électromagnétiques et essais de fonctionnement. Un programme d'essais peut se composer d'un ou de plusieurs de ces éléments.

En général, un programme d'essais a pour but de vérifier si les prescriptions d'un capteur ou d'un système en matière de performances, d'entretien et de temps moyen entre pannes sont respectées dans toutes les conditions prévues de fonctionnement, de stockage et de transport. Il existe aussi des programmes d'essais sur la variabilité pouvant être attendue d'un réseau de capteurs semblables, sur leur reproductibilité fonctionnelle et sur la comparabilité des mesures entre divers capteurs ou systèmes.

La connaissance de la reproductibilité fonctionnelle et de la comparabilité est très importante dans le cas de la climatologie, où une seule base de données à long terme contient généralement des informations émanant de systèmes qui, dans le temps, font appel à divers capteurs et techniques pour mesurer le même élément météorologique. En fait, pour les applications pratiques, une bonne comparabilité opérationnelle entre instruments a plus de valeur que l'exactitude de l'étalonnage absolu. Cette question est développée dans la section sur les essais de fonctionnement.

Même lorsqu'un capteur ou un système est livré accompagné d'un rapport d'étalonnage, il convient d'effectuer d'autres essais d'ambiance et parfois d'étalonnage. On peut prendre comme exemple les systèmes actuels de mesure de la température, dont la sonde est souvent un thermomètre à résistance. En général, plusieurs de ces thermomètres sont étalonnés dans un bain de température par le constructeur, qui en établit les caractéristiques techniques de performances en se fondant sur les résultats de l'étalonnage. Cependant, le système de mesure de la température qui donne la valeur de la température se compose aussi

d'un dispositif d'alimentation et de circuits électroniques sur lesquels la température peut exercer une influence. Il est donc important de faire fonctionner les circuits électroniques et la sonde ensemble sur toute la plage de température en cours d'étalonnage. Il est bon également de remplacer la sonde par une résistance dont le coefficient thermique est connu, qui produira une température connue, et de faire fonctionner les éléments électroniques sur toute la plage de température considérée pour assurer une compensation thermique correcte de ces éléments.

Les utilisateurs devraient aussi disposer d'un programme d'essais aléatoires de capteurs et de systèmes de série, même si des modèles de présérie ont été testés, car des modifications aussi mineures soient-elles du matériel, de la configuration ou des procédés de fabrication risquent d'affecter les caractéristiques de fonctionnement des capteurs et des systèmes.

L'Organisation internationale de normalisation a établi des normes (ISO (1989a et 1989b)) concernant les plans et les procédés d'échantillonnage pour le contrôle de lots d'articles.

4.2.2 Essais d'ambiance

4.2.2.1 Définitions

Les définitions suivantes concernent les qualités d'un système d'instruments devant faire l'objet d'essais en exploitation :

- *Conditions d'exploitation* : conditions ou ensemble de conditions présentes ou attendues pendant qu'un appareil fonctionne normalement conformément à ses caractéristiques techniques de performances.
- *Conditions extrêmes* : conditions ou ensemble de conditions autres que les conditions d'exploitation qu'un instrument est appelé à supporter. Ces conditions peuvent n'avoir que de faibles chances de se produire pendant la durée de vie de l'appareil. Celui-ci n'est pas censé fonctionner normalement dans de telles conditions. Il est cependant censé résister à ces conditions et revenir à un fonctionnement normal lorsque les conditions d'exploitation sont rétablies.
- *Conditions extérieures* : conditions ou ensemble de conditions présentes ou attendues pendant qu'un appareil fonctionne normalement dans un milieu naturel non abrité et non contrôlé.
- *Conditions intérieures* : conditions ou ensemble de conditions présentes ou attendues pendant qu'un appareil est mis sous tension et fonctionne normalement en milieu fermé. On distingue un milieu fermé non contrôlé et un milieu fermé contrôlé artificiellement.

• *Conditions de transport* : conditions ou ensemble de conditions présentes ou attendues pendant le transport d'un appareil. On considère les principaux moyens de transport employés : route, rail, mer et air, ainsi que la gamme complète de conditions rencontrées avant et pendant le transport et en cours de déchargement. En cours de transport, l'appareil est normalement protégé par un emballage.

• *Conditions de stockage* : conditions ou ensemble de conditions présentes ou attendues lorsqu'un appareil est stocké et ne fonctionne pas. On considère tous les types de stockage, depuis le stockage à l'air libre et sans protection jusqu'au stockage à l'intérieur et sous protection. L'appareil se trouve normalement dans son emballage en cours de stockage.

La Commission électrotechnique internationale a également établi un ensemble de normes (CEI, 1990) qui permettent de classer les conditions ambiantes de façon plus précise que ci-dessus. Ces normes, qui définissent une série de milieux météorologiques, physiques et biologiques où peuvent se trouver les produits transportés, stockés, installés et exploités, sont utiles pour les prescriptions concernant le matériel et pour la planification d'essais.

4.2.2.2 Programme d'essais d'ambiance

Les essais d'ambiance effectués en laboratoire permettent de tester rapidement des appareils dans toute une série de conditions et d'intensifier certains effets, comme ceux d'un milieu marin à haute concentration atmosphérique en sel. L'avantage des essais d'ambiance par rapport aux essais sur le terrain est que de nombreuses conditions peuvent être reproduites plus rapidement dans un laboratoire correctement équipé, ce qui permet de tester le matériel dans des conditions climatiques très diverses. Les essais d'ambiance sont importants. Ils peuvent déboucher sur d'éventuels problèmes et permettent d'aborder les essais sur le terrain avec confiance, mais sans remplacer ces derniers.

Un programme d'essais d'ambiance est généralement articulé autour d'un sous-ensemble des conditions suivantes: températures élevées, basses températures, choc thermique, cycle de température, humidité, vent, pluie, pluie verglaçante, poussière, insolation, basses pressions, vibrations et chocs dus au transport. L'étendue ou les limites de chaque essai sont déterminées par les conditions d'exploitation, les conditions extrêmes, les conditions extérieures, les conditions intérieures, les conditions de transport et les conditions de stockage prévues.

L'objet d'un document sur le programme d'essais d'ambiance est de fixer des critères standard d'essais d'ambiance et les protocoles d'essai correspondants

pour la définition des caractéristiques, la conception, l'acquisition et l'essai du matériel. Un tel document devrait être fondé sur les conditions d'exploitation et les conditions extrêmes attendues.

Le Service météorologique national américain a par exemple publié des critères et des protocoles d'essais d'ambiance normalisés (NWS (1984)) fondés sur une étude où il a observé et noté les conditions d'exploitation et les conditions extrêmes de divers éléments météorologiques sur le territoire des États-Unis et proposé des critères d'essai (NWS (1980)). Ces critères et ces procédures se composent de trois parties :

- a) Critères d'essais d'ambiance et limites des essais dans des conditions extérieures, intérieures, de transport et de stockage ;
- b) Protocoles d'essai pour l'évaluation du matériel par rapport aux critères d'essais d'ambiance ;
- c) Justification des renseignements de base concernant les diverses conditions ambiantes auquel le matériel risque d'être exposé, leurs effets potentiels sur ce matériel et la justification correspondante des critères d'essai recommandés.

4.2.3 Essais en environnement électrique et en cas de parasites électromagnétiques

La prédominance de capteurs et de systèmes automatiques de collecte et de traitement des données contenant des éléments électroniques exige dans de nombreux cas un programme exhaustif d'essais de performances en environnement électrique d'exploitation et en cas de parasites électromagnétiques.

Un document concernant un programme d'essais en environnement électrique et en cas de parasites électromagnétiques devrait être rédigé. Ce document a pour objet d'établir des critères standard de tels essais et des procédures d'essai correspondantes et de servir de guide uniforme pour la définition des conditions de susceptibilité à un environnement électrique et à des parasites électromagnétiques en vue de l'acquisition et de la conception de matériel.

Le document devrait être fondé sur une étude où seraient quantifiées l'intensité et la durée des transitoires des signaux et du secteur dues à des phénomènes naturels tels que les orages. Il devrait aussi porter sur des essais concernant les variations attendues de tension et de phase. Si le matériel doit fonctionner dans un aéroport ou dans un autre milieu risquant d'émettre un rayonnement électromagnétique, ce rayonnement devrait être également quantifié et inclus dans la norme. Le programme pourrait aussi avoir pour but de vérifier si le matériel ne produit pas lui-même de rayonnement électromagnétique.

Il faudrait veiller particulièrement au matériel contenant un microprocesseur, donc une horloge à quartz, critique pour les fonctions de synchronisation.

4.2.4 Essais de fonctionnement

L'étalonnage et les essais d'ambiance fournissent une base nécessaire mais insuffisante pour définir les caractéristiques de fonctionnement d'un capteur ou d'un système, car l'étalonnage et les essais en laboratoire ne peuvent rendre entièrement compte du fonctionnement de l'appareil sur le terrain. Il n'existe aucun moyen de simuler les effets synergiques de l'ensemble des facteurs météorologiques variables auxquels sera exposé un instrument en cours de fonctionnement.

Un essai de fonctionnement est simplement un essai à l'extérieur, dans le milieu naturel où un instrument sera appelé à opérer dans une vaste gamme de conditions météorologiques et climatiques et, dans le cas d'un instrument fonctionnant en surface, sur des sols ayant des albédos très divers. Des essais de fonctionnement sont nécessaires pour déterminer dans quelle mesure un capteur ou un système est adapté aux fortes variations du vent, des précipitations, de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire direct, réfléchi et diffus. Les essais de fonctionnement prennent de l'importance à mesure que sont introduits des capteurs faisant appel à des éléments électro-optiques, piézoélectriques et capacitifs. Les valeurs indiquées par ces capteurs peuvent être affectées par des phénomènes fortuits — insectes, araignées et leurs toiles, par exemple — ainsi que par la répartition granulométrique des particules dans l'atmosphère, tous ces éléments devant être déterminés par des essais de fonctionnement.

Dans le cas de nombreuses applications, la comparabilité doit être testée sur le terrain. Pour cela, on teste parallèlement des capteurs ou systèmes semblables ou différents par rapport à un échantillon de référence sur le terrain. Ce sujet est abordé par Hoehne (1971, 1972 et 1977).

Les essais de fonctionnement peuvent être planifiés et réalisés par des laboratoires privés ou par un organisme d'essai relevant du Service météorologique ou d'une autre organisation d'utilisateurs. Lors de l'acquisition et de l'exploitation du matériel, il faut tenir compte du niveau de formation et de compétence des observateurs et techniciens qui vont utiliser le système. La manipulation du matériel par ces personnes devrait faire partie du programme d'essais. Les personnes qui vont installer, exploiter, entretenir et réparer le matériel devraient évaluer ces aspects du capteur ou du système considéré, et notamment la pertinence des instructions et des manuels.

Il faudrait également tenir compte de leur niveau de compétence lors de la définition des prescriptions en vue d'acheter le matériel.

4.3 ÉTALONNAGE

4.3.1 Objet de l'étalonnage

L'étalonnage d'un capteur ou d'un système constitue la première étape en vue de définir la validité des données. Il s'agit en général de comparer l'appareil à un étalon connu pour déterminer dans quelle mesure les résultats qu'il produit correspondent à cet étalon sur la plage de fonctionnement attendue. Dans le cas d'un étalonnage en laboratoire, on suppose implicitement que les caractéristiques de l'instrument sont suffisamment stables pour que l'étalonnage réalisé s'applique sur le terrain. Une analyse des étalonnages successifs réalisés peut confirmer la stabilité de l'instrument.

Plus précisément, l'étalonnage est un ensemble d'opérations qui permet, dans des conditions définies, d'établir un rapport entre les valeurs indiquées par un instrument ou un système de mesure et les valeurs correspondantes connues d'une mesurande, autrement dit de la grandeur à mesurer. L'étalonnage devrait permettre de déterminer l'erreur systématique ou l'écart par rapport à l'étalon de référence du capteur ou du système considéré, les erreurs aléatoires qu'il commet, la plage de validité de l'étalonnage et la présence de seuils ou de zones où les résultats ne sont pas linéaires. Il devrait aussi permettre de déterminer la résolution et l'hystérésis de l'appareil. L'hystérésis devrait être identifiée en soumettant l'appareil à une succession de cycles sur sa plage de fonctionnement en cours d'étalonnage. Le résultat d'un étalonnage s'exprime parfois par un ou plusieurs facteurs d'étalonnage qui prennent la forme d'un tableau ou d'une courbe d'étalonnage. Les résultats d'un étalonnage peuvent être consignés dans un document appelé certificat ou rapport d'étalonnage.

Le certificat ou rapport en question devrait définir une erreur systématique qui peut être ensuite supprimée par ajustement mécanique, électrique ou logiciel. L'erreur aléatoire rémanente ne peut pas se répéter et ne peut pas être éliminée, mais elle peut être définie statistiquement au moyen d'un nombre suffisant de répétitions des mesures en cours d'étalonnage.

4.3.2 Étalons

L'étalonnage d'instruments ou de systèmes de mesure se fait habituellement par comparaison avec un ou

plusieurs étalons. Ces étalons sont classés selon leur qualité métrologique; Leur définition (ISO (1993))⁴, qu'on trouvera dans le chapitre 1 de la Partie 1 du présent Guide, peut se résumer ainsi :

- *Étalon primaire* : étalon qui présente les plus hautes qualités métrologiques dans un domaine spécifié et dont la valeur est acceptée sans référence à d'autres étalons.
- *Étalon secondaire* : étalon dont la valeur est fixée par comparaison avec un étalon primaire.
- *Étalon international* : étalon reconnu par un accord international pour servir de base internationale à la fixation des valeurs de tous les autres étalons de la grandeur concernée.
- *Étalon national* : étalon reconnu par une décision officielle nationale pour servir de base dans un pays à la fixation des valeurs de tous les autres étalons de la grandeur concernée.
- *Étalon de référence* : étalon, généralement de la plus haute qualité métrologique disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesures qui y sont effectuées.
- *Étalon de travail* : étalon utilisé couramment pour étalonnaux ou contrôler des appareils de mesure.
- *Étalon de transfert* : étalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.
- *Étalon voyageur* : étalon, parfois de construction spéciale, prévu pour son transport en des lieux différents.

Les étalons primaires sont conservés par de grands établissements internationaux ou nationaux. Les étalons secondaires, souvent conservés par de grands laboratoires d'étalonnage, ne sont généralement pas adaptés à un emploi sur le terrain. Les étalons de travail sont en général des instruments de laboratoire qui ont été étalonnés par rapport à un étalon secondaire. Les étalons de travail pouvant être utilisés sur le terrain sont généralement appelés étalons de transfert. On peut également se servir d'étalons de transfert pour comparer des instruments en laboratoire ou sur le terrain.

4.3.3 Traçabilité

La définition de la traçabilité (ISO (1993))⁴ est la suivante :

⁴ Le Guide pour l'expression des incertitudes de mesures ISO/IEC Guide 98:1993 a été révisé et remplacé: ISO/IEC Guide 98-3:2008

« Propriété d'un résultat d'un mesurage ou d'un étalon tel qu'il puisse être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées. »

Dans le domaine de la météorologie, il est courant de relier les mesures de la pression à des étalons voyageurs, à des étalons de travail et à des étalons secondaires par rapport à des étalons nationaux ou primaires. Les incertitudes cumulées sont ainsi connues (sauf celles qui se produisent sur le terrain, qui doivent être déterminées par des essais sur site). Les mesures de la température se prêtent à la même pratique.

Il convient d'appliquer ce même principe à la mesure de toute quantité dont l'incertitude doit être connue.

4.3.4 Pratiques en matière d'étalonnage

L'étalonnage d'instruments météorologiques s'effectue normalement dans un laboratoire disposant d'étalons et d'appareils d'étalonnage appropriés. Il peut s'agir d'un laboratoire national, privé ou relevant du Service météorologique concerné ou d'une autre organisation d'utilisateurs. Un laboratoire d'étalonnage est chargé de garantir la qualité nécessaire de ses étalons et de consigner leur traçabilité. Il doit aussi produire des certificats d'étalonnage pouvant inclure une évaluation de l'exactitude des étalonnages. Pour garantir la traçabilité, un laboratoire d'étalonnage doit être reconnu et agréé par les autorités nationales compétentes.

Les constructeurs d'instruments météorologiques doivent accompagner leurs produits de qualité — baromètres ou thermomètres standard, par exemple — de certificats ou de rapports d'étalonnage. Ces documents sont ou ne sont pas compris dans le prix de base des instruments, ou alors ils sont délivrés en option. Les certificats d'étalonnage délivrés par des laboratoires compétents d'étalonnage sont parfois plus chers que les certificats d'usine. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, des essais d'ambiance et de fonctionnement et parfois des essais supplémentaires d'étalonnage sont à effectuer.

Les utilisateurs peuvent aussi acheter des appareils d'étalonnage ou des étalons pour leurs propres laboratoires. Un bon appareil d'étalonnage doit toujours être associé à un étalon approprié, par exemple un caisson polytrope donnant la température de bain d'un liquide avec un ensemble de thermomètres à tube de verre agrés et/ou de thermomètres à résistance agrés. Dans cet exemple, il faudrait

aussi envisager l'emploi d'une huile de silicium non conductrice. Ainsi, si un appareil de mesure de la température est monté sur une carte de circuits électroniques, la carte entière peut être immergée dans le bain, ce qui permet de tester l'appareil dans sa configuration de fonctionnement. Il faut non seulement que le matériel d'étalonnage et les étalons soient de bonne qualité, mais aussi que les ingénieurs et les techniciens du laboratoire d'étalonnage aient une formation correcte en métrologie de base et en ce qui concerne l'emploi des appareils d'étalonnage et des étalons dont ils disposent.

Lorsque les instruments étalonnés et testés à l'origine sont acceptés par l'utilisateur, celui-ci doit mettre en place un programme de contrôle de l'étalonnage et d'étalonnage régulier. Des instruments tels que les baromètres au mercure sont susceptibles de se casser lorsqu'on les transporte sur un site. Dans les stations éloignées, ces instruments doivent être déplacés le moins possible et être étalonnés par rapport à des étalons voyageurs, plus robustes, que les contrôleurs peuvent transporter d'une station à une autre. Les étalons voyageurs doivent être fréquemment comparés à un étalon de travail ou de référence dans le laboratoire d'étalonnage et avant et après chaque tournée d'inspection.

On trouvera dans les chapitres pertinents du présent Guide et dans des manuels spécialisés (voir les références ci-après) des détails sur les modalités d'étalonnage en laboratoire de baromètres, de thermomètres, d'hygromètres, d'anémomètres, de compteurs de rayonnement et d'autres appareils. Ces ouvrages contiennent également des renseignements sur les instruments et appareils d'étalonnage standard internationaux reconnus. Les modalités d'étalonnage des stations météorologiques automatiques, qui exigent une attention particulière, sont abordées dans le chapitre 1 de la Partie II.

Le document OMM (1989) présente une analyse détaillée des modalités employées par divers Services météorologiques pour étalonner des instruments de mesure de la température, de l'humidité, de la pression et du vent.

4.4 COMPARAISONS

La comparaison d'instruments et de systèmes d'observation, associée à des protocoles agréés de contrôle de la qualité, est essentielle pour la création de jeux de données compatibles. Toutes les comparaisons devraient être planifiées et réalisées soigneusement pour garantir une qualité suffisante et uniforme de la mesure de chaque variable météorologique.

Diverses quantités météorologiques ne peuvent être comparées directement à des étalons, donc à des références absolues: la visibilité, la hauteur de la base des nuages et les précipitations, par exemple. Dans ces cas-là, les comparaisons ont une grande valeur.

La comparaison ou l'évaluation d'instruments et de systèmes d'observation peut être organisée et effectuée aux niveaux suivants :

- a) Comparaisons internationales : des participants de tous les pays intéressés peuvent y participer à la suite d'une invitation générale ;
- b) Comparaisons régionales : des participants des pays d'une région donnée (par exemple une région de l'OMM) peuvent y participer à la suite d'une invitation générale ;
- c) Comparaisons multi et bilatérales : des participants de deux ou plusieurs pays peuvent y participer sans invitation générale ;
- d) Comparaisons nationales : elles ont lieu à l'intérieur d'un pays.

En raison de l'importance de la comparabilité des mesures sur le plan international, l'Organisation météorologique mondiale organise de temps à autre des comparaisons internationales et régionales d'instruments par l'intermédiaire d'un de ses organes consti-

tuants. Les comparaisons ou évaluations d'instruments et de systèmes d'observation risquent d'être très longues et coûteuses. C'est pourquoi on a établi des règles afin d'assurer une coordination efficace. Ces règles, reproduites ci-après dans les Annexes 4.A et 4.B⁵, correspondent à des directives générales et devraient, en cas de besoin, être complétées par des règles de travail pour chaque comparaison (voir les chapitres pertinents du présent Guide).

Des comptes rendus de comparaisons internationales organisées par l'OMM sont cités dans d'autres chapitres du présent Guide (voir par exemple les chapitres 3, 4, 9, 12, 14 et 15 de la Partie I). L'Annexe 4.C présente une liste des comparaisons internationales qui ont reçu l'aval de la Commission des instruments et des méthodes d'observation et qui ont été publiées dans des documents techniques de l'OMM.

Les comptes rendus de comparaisons, quel qu'en soit le niveau, devraient être publiés et mis à la disposition de la communauté météorologique dans son ensemble.

⁵ Annexe à la recommandation 14 adoptée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation à sa onzième session et Annexe IX (1994).

ANNEXE 4.A

PROCÉDURES APPLICABLES AUX COMPARAISONS MONDIALES ET RÉGIONALES D'INSTRUMENTS ORGANISÉES PAR L'OMM

- Une comparaison d'instruments et de méthodes d'observation organisée par l'OMM doit être approuvée par l'organe constituant de l'Organisation concerné afin d'être reconnue comme comparaison OMM.
- Le Conseil exécutif déterminera s'il y a lieu d'approuver la comparaison et de l'inscrire dans le budget-programme de l'OMM.
- S'il faut procéder d'urgence à une comparaison particulière qui n'a pas été prévue lors la session d'un organe constituant, le président de l'organe compétent peut présenter une proposition correspondante au Président de l'OMM, pour approbation.
- Bien avant le début de chaque comparaison, le Secrétaire général, d'entente avec le président de la CIMO et éventuellement les présidents d'autres commissions techniques ou associations régionales ou les chefs de programmes concernés, vérifiera si un ou plusieurs Membres sont disposés à jouer le rôle d'hôte et quels sont les Membres qui ont l'intention de participer à cette comparaison.
- Lorsqu'au moins un Membre a accepté d'assumer les fonctions de pays hôte et qu'un nombre suffisant de Membres ont fait part de leur intention de participer à la comparaison prévue, le président de la CIMO établit un Comité international d'organisation après avoir, le cas échéant, pris l'avis des chefs d'organes constituants concernés.
- Avant le début de la comparaison, le Comité international doit prendre des décisions au sujet de son organisation, par exemple en ce qui concerne les principaux objectifs, le lieu, la date et la durée de la comparaison, les conditions de participation, l'acquisition de données, les méthodes de traitement et d'analyse, les modalités prévues pour la publication des résultats, les règles régissant la comparaison et la responsabilité du ou des hôtes et des participants.
- Le pays hôte doit désigner un directeur de projet, qui sera responsable de la bonne conduite des tra-

vaux de comparaison, de l'analyse des données et de l'établissement d'un rapport final comme convenu par le Comité international d'organisation. Le directeur du projet sera membre de droit du Comité international d'organisation.

- Si le Comité international d'organisation a décidé de procéder à la comparaison en des lieux situés dans différents pays hôtes, chacun de ces pays doit désigner un responsable local. Les tâches de ce responsable ainsi que la gestion globale du projet seront précisées par le Comité international d'organisation.
- Le Secrétaire général est invité à annoncer, dès que possible après l'établissement du Comité international d'organisation, la comparaison prévue. Dans son annonce, il donnera notamment des informations sur l'organisation de la comparaison et sur les règles qui la régissent, comme convenu par ce comité. Les Membres participants sont tenus de respecter ces règles.
- La responsabilité de toute autre correspondance entre le ou les pays hôtes et les participants au sujet de questions d'organisation est confiée aux directeurs de projets et éventuellement aux responsables locaux, à moins que le Comité d'organisation n'ait pris d'autres dispositions à cet égard.
- Pendant la période où se déroule la comparaison, des réunions du Comité d'organisation peuvent être prévues le cas échéant.
- Une fois la comparaison terminée, le Comité d'organisation examine et approuve les principaux résultats de l'analyse des données recueillies et formule des propositions en vue de l'utilisation de ces résultats par la communauté météorologique.
- Le rapport final de la comparaison, établi par le directeur du projet et approuvé par le Comité d'organisation, doit être publié dans la série de rapports de l'OMM consacrés aux instruments et aux méthodes d'observation.

ANNEXE 4.B

PRINCIPES DIRECTEURS POUR LES COMPARAISONS D'INSTRUMENTS ORGANISÉES PAR L'OMM

1. INTRODUCTION

1.1 Les présents principes directeurs constituent le complément des procédures applicables pour les comparaisons mondiales et régionales d'instruments météorologiques organisées par l'OMM. Partant du constat qu'un comité international d'organisation a été mis sur pied, ils en fixent les modalités d'action (voir en particulier l'Annexe 12.C du chapitre 12 de la Partie I).

1.2 Cependant, comme toutes les comparaisons diffèrent dans une certaine mesure les unes des autres, on considérera qu'il s'agit ici en fait d'une énumération générale des tâches. De ce fait, celles-ci seront adaptées en fonction de la situation, étant entendu que les critères qui doivent régir la conduite des comparaisons et des évaluations de l'OMM sont l'objectivité et la valeur scientifique.

1.3 Pour l'exécution des comparaisons, on pourra s'inspirer des rapports finals de comparaisons précédentes de l'OMM et des rapports de réunions des comités d'organisation. Ces rapports peuvent être obtenus auprès du Département de la Veille météorologique mondiale, au Secrétariat de l'OMM.

2. OBJECTIFS D'UNE COMPARAISON

Le Comité d'organisation, qui devrait examiner les objectifs à atteindre, détermine les problèmes particuliers qui risquent de se poser. Il est chargé de préparer un exposé clair et détaillé des principaux objectifs de la comparaison et d'arrêter les critères sur lesquels on se fondera pour en évaluer les résultats. Il doit également déterminer quelle est la meilleure façon de garantir le succès de la comparaison, en tirant parti, le cas échéant, de l'expérience acquise au cours de comparaisons antérieures.

3. LIEU, DATE ET DURÉE DE LA COMPARAISON

3.1 Le Secrétariat invitera le pays hôte à fournir au Comité d'organisation une description du lieu proposé pour la comparaison et du dispositif prévu

(emplacement(s), conditions environnementales et climatologiques, principales caractéristiques topographiques, etc.). Il désignera en outre un directeur de projet⁶.

3.2 Le Comité d'organisation vérifiera si le lieu et le dispositif proposés conviennent, proposera à son tour toutes les modifications qu'il jugera nécessaires et donnera ensuite son agrément concernant le lieu et le dispositif retenu. Le directeur du projet préparera ensuite une description détaillée de ce lieu et de l'environnement correspondant. Le Comité d'organisation, d'entente avec le directeur du projet, arrêtera la date du début et fixera la durée de la comparaison.

3.3 Le directeur du projet doit proposer une date à laquelle le lieu retenu et le dispositif prévu seront disponibles pour l'installation de l'équipement nécessaire et sa mise en communication avec le système d'acquisition de données. Il y a lieu de prévoir une certaine période de vérifications et d'essais du matériel, qui permettra également aux exploitants de se familiariser avec les procédures d'exécution.

4. PARTICIPATION À LA COMPARAISON

4.1 Le Comité d'organisation doit examiner les aspects techniques et pratiques, les caractéristiques souhaitables et les préférences, les restrictions, les priorités et les descriptions des différents types d'instruments qui doivent faire l'objet de la comparaison.

4.2 Normalement, seuls seront admis les instruments régulièrement utilisés ou ceux qui devraient l'être sous peu par les Membres. Il incombe aux Membres participants de procéder, avant l'expédition de leurs instruments, à l'étalonnage de ceux-ci par rapport à des étalons et de produire les certificats d'étalonnage appropriés. On peut inviter les participants à fournir deux instruments identiques de chaque catégorie afin d'assurer une plus grande fiabilité des données. Cependant, il ne s'agit pas là d'une condition de participation.

³ Lorsque plusieurs lieux sont prévus pour la comparaison, des responsables locaux seront désignés, selon les besoins. Certaines tâches du directeur du projet indiquées dans le présent document seront déléguées aux responsables locaux.

4.3 Le Comité d'organisation doit établir un questionnaire détaillé, qui lui permettra d'obtenir les informations requises sur chaque instrument proposé pour la comparaison. Le directeur du projet donnera encore d'autres détails et mettra la dernière main à ce questionnaire le plus rapidement possible. Les participants seront invités à préciser clairement dans leurs réponses les caractéristiques concernant les interfaces et le logiciel et à présenter une documentation appropriée. (On peut se procurer une liste des questions susceptibles de figurer dans un questionnaire auprès du Secrétariat de l'OMM.)

4.4 Le président du Comité d'organisation doit ensuite :

- a) Charger le Secrétaire général d'inviter officiellement les Membres (qui ont manifesté leur intérêt) à participer à la comparaison. L'invitation doit comprendre toutes les informations nécessaires relatives aux règles régissant la comparaison, telles qu'elles ont été établies par le Comité d'organisation et le directeur du projet ;
- b) Charger le directeur du projet de s'occuper de tous les autres contacts avec les participants.

5. ACQUISITION DE DONNÉES

5.1 Installation de l'équipement

5.1.1 Le Comité d'organisation doit étudier une proposition de schéma pour l'installation des instruments établie par le directeur du projet et arrêter la disposition des instruments pour la comparaison. On veillera en particulier à ce que l'emplacement et l'exposition des instruments soient appropriés, en tenant compte des critères et normes de l'OMM et d'autres organisations internationales. Les critères adoptés pour ce qui est de l'emplacement et de l'exposition devront être documentés.

5.1.2 Le directeur du projet devra examiner, au nom du Comité d'organisation, certaines demandes d'installation d'équipement formulées par des participants et les approuver s'il les juge acceptables.

5.2 Instruments étalons ou de référence

Le pays hôte doit tout mettre en œuvre afin qu'au moins un instrument de référence soit présent pour la comparaison. L'étalonnage de cet instrument doit être effectué par rapport à un étalon national ou international. Il y a lieu de fournir au Comité d'organisation une description et une spécification de l'instrument étalon. S'il n'existe pas

d'instrument étalon ou de référence reconnu pour la ou les variables à mesurer, le Comité d'organisation conviendra d'une méthode pour choisir un instrument auquel on pourra se référer pour la comparaison.

5.3 Observations et mesures connexes

Le Comité d'organisation doit approuver une liste de variables météorologiques et environnementales qui doivent être mesurées ou observées sur le lieu de la comparaison pendant toute la durée de celle-ci. Il établira à cet égard un programme de mesure et chargera le pays hôte de l'exécuter. Les résultats de l'exécution de ce programme seront enregistrés sous une forme qui en permette l'analyse.

5.4 Système d'acquisition de données

5.4.1 Le pays hôte doit normalement fournir le système nécessaire d'acquisition de données, qui doit permettre d'enregistrer les signaux analogiques ou par impulsion et les signaux numériques (en série et en parallèle) provenant de tous les instruments des participants. Il communiquera au Comité d'organisation une description et un schéma de la chaîne complète de mesure. Le Comité d'organisation, d'entente avec le directeur du projet, décidera si les enregistrements graphiques en mode analogique et les données visuelles affichées seront acceptés dans le cadre de la comparaison aux fins d'analyse ou uniquement pour la vérification du bon fonctionnement des opérations.

5.4.2 Le matériel et le logiciel du système d'acquisition de données doivent être soumis, avant le début de la comparaison, à des essais concluants, et il y a lieu de prendre des mesures pour éviter des lacunes en ce qui concerne les données enregistrées pendant la période de la comparaison.

5.5 Méthode d'acquisition de données

Le Comité d'organisation doit donner son accord pour des procédures appropriées d'acquisition de données, par exemple en ce qui concerne la fréquence des mesures, l'échantillonnage des données, l'établissement de moyennes, la réduction des données, leur forme de présentation, le contrôle de la qualité des données en temps réel, etc. Lorsque les participants doivent communiquer des données au cours de la comparaison ou lorsque des données sont disponibles en tant qu'enregistrements graphiques ou sous forme de données visuelles, le Comité d'organisation doit prendre des décisions concernant la responsabilité en matière de vérification de ces données et la période pendant laquelle elles doi-

vent être soumises au directeur du projet ainsi que la forme de présentation et le support permettant leur stockage dans la base de données du pays hôte. Lorsque cela est possible, il y a lieu de procéder à des comparaisons directes par rapport à l'instrument de référence.

5.6 **Calendrier de la comparaison**

Le Comité d'organisation doit prévoir un calendrier de la comparaison qui tienne compte à la fois des tâches courantes et des tâches spécifiques et établir ce calendrier. Les détails seront ensuite réglés par le directeur du projet et ses collaborateurs.

6. **TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES**

6.1 **Base de données et accès aux données**

6.1.1 Toutes les données indispensables à la comparaison, y compris celles qui concernent la météorologie et l'environnement, doivent être stockées dans une base de données en vue de leur analyse ultérieure sous la supervision du directeur du projet. Le Comité d'organisation, en collaboration avec le directeur du projet, propose une forme de présentation commune pour l'ensemble des données, y compris celles qui sont communiquées par les participants pendant la comparaison. Il doit convenir d'une surveillance en temps quasi réel et d'un contrôle de la qualité afin d'assurer la validité des données.

6.1.2 Une fois la comparaison terminée, le pays hôte fournit, sur demande, à chaque Membre participant un jeu de données provenant de l'instrument (ou des instruments) qu'il a soumis. Ce jeu doit également contenir des données météorologiques ou environnementales ainsi que des données de référence.

6.2 **Analyse des données**

6.2.1 Le Comité d'organisation doit proposer un cadre pour l'analyse et le traitement des données et pour la présentation des résultats. Il donnera son accord concernant des algorithmes de conversion des données, d'étalonnage et de correction et établira une liste des termes, définitions, abréviations et relations (lorsque ceux-ci diffèrent de ceux qui sont couramment acceptés). Il donnera une description détaillée des méthodes statistiques à appliquer en fonction des objectifs de la comparaison.

6.2.2 Lorsqu'il n'est pas possible de procéder à une comparaison directe et synchronisée d'instruments réunis en une installation unique (par exemple dans le cas où les instruments visés se trouveraient dans des lieux séparés), il faut prendre en considération des méthodes d'analyse fondées sur des distributions statistiques. S'il n'existe pas d'instrument de référence (par exemple pour la base des nuages ou la portée optique météorologique), on comparera les instruments concernés à l'instrument de référence choisi parmi eux en tenant compte de valeurs médianes ou correspondant à un type donné et en veillant à exclure les valeurs non représentatives de la sous-série de données retenue.

6.2.3 Lorsqu'il a été procédé à une seconde comparaison, quelque temps après la première ou lors d'une phase ultérieure d'une comparaison en cours, on tiendra compte, pour les méthodes d'analyse à appliquer la présentation, de ce qui a été fait initialement. Mais cela ne doit pas empêcher de faire également appel à de nouvelles méthodes.

6.2.4 Le directeur du projet est normalement chargé de procéder au traitement et à l'analyse des données. Il doit, dès que possible, vérifier si les procédures d'analyse retenues conviennent et, au besoin, établir un rapport d'activité au sujet duquel les membres du Comité d'organisation pourront formuler des observations. L'on envisagera d'apporter les modifications jugées nécessaires en fonction de ces vérifications et observations.

6.2.5 Une fois la comparaison terminée, le Comité d'organisation en examine les résultats ainsi que l'analyse effectuée par le directeur du projet. Il doit accorder une attention particulière aux recommandations concernant l'utilisation des résultats de la comparaison et au contenu du rapport final.

7. **RAPPORT FINAL DE LA COMPARAISON**

7.1 Le Comité d'organisation doit déterminer les grands axes du rapport final et charger ensuite le directeur du projet d'en établir une version provisoire.

7.2 Le rapport final de la comparaison doit contenir, pour chaque instrument, un résumé des principales caractéristiques de fonctionnement et des facteurs d'exploitation. Les résultats de l'analyse statistique doivent être présentés dans des

tableaux ou des graphiques, selon qu'il convient. Les graphiques présentant des séries chronologiques doivent être envisagés pour certaines périodes correspondant à des événements d'une importance particulière. Le pays hôte doit être invité à préparer un chapitre où seront décrits la base de données et les moyens et installations utilisés pour le traitement, l'analyse et le stockage des données.

7.3 Le Comité d'organisation doit convenir de la procédure à suivre en vue de l'approbation du rapport final. Par exemple :

- a) Le projet de rapport final sera établi par le directeur du projet et soumis à l'ensemble des membres du Comité d'organisation, de même, le cas échéant, qu'aux Membres participants ;
- b) Les observations et les modifications proposées doivent être communiquées au directeur du projet dans un délai bien précisé, avec copie au président du Comité d'organisation ;
- c) Au cas où seules de légères modifications sont proposées, le directeur du projet peut mettre la dernière main au rapport et l'envoyer au Secrétariat de l'OMM pour publication ;
- d) Si d'importantes modifications sont prévues ou si se posent de graves problèmes qui ne peuvent être réglés par correspondance, une réunion supplémentaire du Comité d'organisation doit être envisagée. (Le président de la CIMO doit alors être informé immédiatement de la situation.)

7.4 Le Comité d'organisation peut convenir que les résultats intermédiaires et finals ne pourront être présentés que par le directeur du projet et ses collaborateurs lors de conférences techniques.

8. RESPONSABILITÉS

8.1 Responsabilités des participants

8.1.1 Les participants assumeront l'entièvre responsabilité du transport de tout l'équipement présenté pour la comparaison, de l'ensemble des dispositions à prendre en matière d'importation et d'exportation et des coûts correspondants. Il conviendra d'assurer l'application de procédures correctes d'importation et d'exportation afin d'éviter des retards qui, autrement, pourraient se produire.

8.1.2 Il appartiendra généralement aux participants d'installer et de retirer tout l'équipement sous la supervision du directeur du projet, à moins que le pays hôte ait accepté de le faire.

8.1.3 Chaque participant fournira tous les accessoires nécessaires, le matériel de montage, les câbles et connecteurs de communication et d'alimentation (compatibles avec les normes du pays hôte), les pièces de rechange et les consommables pour son équipement. Si un participant a besoin d'un type de raccordement électrique spécial ou hors norme, il doit fournir son propre convertisseur ou adaptateur. Les participants présenteront toutes les instructions détaillées et tous les manuels nécessaires pour l'installation, l'exploitation, l'étalonnage et l'entretien régulier de leur équipement.

8.2 Appui du pays hôte

8.2.1 Si la demande lui en est faite, le pays hôte doit fournir aux Membres participants les informations nécessaires sur les procédures d'importation et d'exportation temporaires ou permanentes (dans le cas des consommables). Il doit prêter son concours pour le déballage et l'installation de l'équipement des participants et fournir les locaux et le mobilier destinés à recevoir tout équipement exigeant une protection contre les intempéries et à assurer le stockage des pièces de rechange, des manuels, des consommables, etc.

8.2.2 Le pays hôte doit fournir en quantité suffisante l'équipement ou les ouvrages auxiliaires, tels que tours, abris, bases ou fondations.

8.2.3 L'alimentation électrique nécessaire pour l'ensemble des instruments sera fournie. Il convient de donner aux participants les indications nécessaires concernant la tension et la fréquence ainsi que la stabilité de l'alimentation. La connexion des instruments au système d'acquisition de données et au circuit d'alimentation électrique s'effectuera en collaboration avec les participants. Le directeur du projet doit s'entendre avec chaque participant au sujet de la fourniture, par celui-ci ou par le pays hôte, de câbles d'alimentation électrique ou de communication d'une longueur suffisante [et des connecteurs appropriés].

8.2.4 C'est au pays hôte qu'il appartient d'obtenir les autorisations officielles pour les mesures à effectuer dans l'atmosphère en ce qui concerne l'utilisation de fréquences, l'émission d'un rayonnement laser, le respect du droit civil ou aéronautique, etc. Chaque participant présentera les documents nécessaires, si le directeur lui en fait la demande.

8.2.5 Le pays hôte peut fournir des informations sur les points suivants : logement, voyage, transport local, appui logistique quotidien, etc.

8.3 Services assurés par le pays hôte

8.3.1 Un service d'exploitation régulier ne sera assuré par le pays hôte que pour des comparaisons de longue durée pour lesquelles l'absence des participants ou de leurs représentants peut être justifiée.

8.3.2 Lorsque le pays hôte assume la responsabilité du service d'exploitation, il doit :

- a) assurer pour chaque instrument un service normal d'exploitation, en ce qui concerne par exemple le nettoyage, la recharge et les ajustements réguliers prévus dans les consignes d'exploitation des participants ;
- b) vérifier quotidiennement chaque instrument participant à la comparaison et informer immédiatement la personne désignée pour assurer le contact de toute anomalie qui ne peut être corrigée dans le cadre de l'entretien régulier ;
- c) tout mettre en œuvre pour que soient effectuées les vérifications régulières d'étalonnage selon les consignes données par les participants.

8.3.3 Le directeur du projet doit tenir un registre sur le fonctionnement de tout le matériel participant à la comparaison. Ce registre contiendra des notes relatives à tout ce qui, sur les lieux de la comparaison, peut avoir une incidence sur celle-ci, à tous les faits marquants concernant le matériel qui fait l'objet de la comparaison et à tout ce qui a trait à l'équipement et aux moyens et installations fournis par le pays hôte.

9.**RÈGLES APPLICABLES
PENDANT LA COMPARAISON**

9.1 Le directeur du projet assurera la surveillance générale de la comparaison au nom du Comité d'organisation.

9.2 Aucune modification du matériel ou du logiciel ne sera autorisée sans l'accord du directeur du projet.

9.3 De petites réparations telles que le remplacement de fusibles seront autorisées avec l'accord du directeur du projet.

9.4 Les vérifications d'étalonnage et l'entretien du matériel auxquels les participants doivent procéder et qui exigent des connaissances spécialisées ou un équipement spécifique seront autorisés selon des procédures préétablies.

9.5 Tout problème qui pourrait se poser au sujet du matériel présenté par les participants doit être examiné par le directeur du projet.

9.6 Le directeur du projet peut choisir pendant la comparaison une période où il prolonge les intervalles d'exploitation entre les entretiens réguliers afin d'évaluer dans quelle mesure les instruments sont sensibles aux conditions environnementales. Cet intervalle prolongé sera le même pour l'ensemble des instruments.

ANNEXE 4.C

COMPTES RENDUS DE COMPARAISONS INTERNATIONALES REALISÉES SOUS LES AUSPICES DE LA COMMISSION DES INSTRUMENTS ET DES MÉTHODES D'OBSERVATION

<i>Sujet</i>	<i>Instruments et compte-rendu d'observation n°</i>	<i>Titre du compte-rendu</i>
Durée d'ensoleillement	16	Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI (Budapest, Hongrie, juillet-décembre 1984), G. Major, OMM/TD-No. 146 (1986).
Rayonnement ^a	16	Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI (Budapest, Hongrie, juillet-décembre 1984), G. Major, OMM/TD-No. 146 (1986).
Précipitations	17	International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge (1984), B. Sevruk et W.R. Hamon, OMM/TD-No. 38 (1984).
Radiosondes	28	WMO International Radiosonde Comparison, Phase I (Beaufort Park, Royaume-Uni, 1984), A. H. Hooper, OMM/TD-No. 174 (1986).
Radiosondes	29	WMO International Radiosonde Intercomparison, Phase II (Wallop Island, États-Unis, 4 février – 15 mars 1985), F. J. Schmidlin, OMM/TD-No. 312 (1988).
Radiosondes	30	WMO International Radiosonde Comparison (Royaume-Uni, 1984/ États-Unis, 1985), J. Nash et F. J. Schmidlin, OMM/TD-No. 195 (1987).
Hauteur de la base des nuages	32	WMO International Ceilometer Intercomparison (Royaume-Uni, 1986), D. W. Jones, M. Ouldridge et D. J. Painting, OMM/TD-No. 217 (1988).
Humidité	34	WMO Assmann Aspiration Psychrometer Intercomparison (Potsdam, République démocratique allemande, 1987), D. Sonntag, OMM/TD-No. 289 (1989).
Humidité	38	WMO International Hygrometer Intercomparison (Oslo, Norvège, 1989), J. Skaar, K. Hegg, T. Moe et K. Smedstud, OMM/TD-No. 316 (1989).
Radiosondes	40	WMO International Radiosonde Comparison, Phase III (Dzhambul, URSS, 1989), A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash et N. Zaitseva, OMM/TD-No. 451 (1991).
Visibilité	41	The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements (Royaume-Uni, 1988/1989), D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldridge et W.R. Sparks, OMM/TD-No. 401 (1990).
Rayonnement ^a	43	First WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA II and RA V (Tokyo, Japon, 23 janvier – 4 février 1989), Y. Sano, OMM/TD-No. 308 (1989).
Rayonnement ^a	44	First WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA IV (Ensenada, Mexique, 20–27 avril 1989), I. Galindo, OMM/TD-No. 345 (1989).
Pression	46	The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison (de Bilt, Pays-Bas, 1989–1991), J.P. van der Meulen, OMM/TD-No. 474 (1992).
Rayonnement ^a	53	Segunda Comparación de la OMM de Pirhelíómetros Patrones Nacionales AR III (Buenos Aires, Argentine, 25 novembre – 13 décembre 1991), M. Ginzburg, OMM/TD-No. 572 (1992).
Radiosondes	59	WMO International Radiosonde Comparison, Phase IV (Tsukuba, Japon, 15 février – 12 mars 1993), S. Yagi, A. Mita et N. Inoue, OMM/TD-No. 742 (1996).
Vent	62	WMO Wind Instrument Intercomparison (Mont Aigoual, France, 1992–1993), P. Gregoire et G. Oualid, OMM/TD-No. 859 (1997).

<i>Sujet</i>	<i>Instruments et compte-rendu d'observation n°</i>	<i>Titre du compte-rendu</i>
Rayonnement ^a	64	Tercera Comparación Regional de la OMM de Pirhelímetros Patrones Nacionales AR III – Informe Final (Santiago, Chili, 24 février – 7 mars 1997), M.V. Muñoz, OMM/TD-No. 861 (1997).
Précipitations	67	WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison – Final Report, B.E. Goodison, P.Y.T. Louie et D. Yang, OMM/TD-No. 872 (1998).
Temps présent	73	WMO Intercomparison of Present Weather Sensors/Systems – Final Report (Canada et France, 1993–1995), M. Leroy, C. Bellevaux, J.P. Jacob, OMM/TD-No. 887 (1998).
Radiosondes	76	Executive Summary of the WMO Intercomparison of GPS Radiosondes (Alcantâra, Maranhão, Brésil, 20 mai – 10 juin 2001), R.B. da Silveira, G. Fisch, L.A.T. Machado, A.M. Dall'Antonia Jr., L.F. Sapucci, D. Fernandes et J. Nash, OMM/TD-No. 1153 (2003).
Radiosondes	83	WMO Intercomparison of Radiosonde Systems, Vacoas, Maurice, 2–25 février 2005, J. Nash, R. Smout, T. Oakley, B. Pathack et S. Kurnosenko, OMM/TD-No. 1303 (2006).
Intensité des précipitations	84	WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges – Final Report, France, Pays-Bas, Italie, septembre 2004 – septembre 2005, L. Lanza, L. Stagi, M. Leroy, C. Alexandropoulos, W. Wauben, OMM/TD-No. 1304 (2006).
Humidité	85	WMO Radiosonde Humidity Sensor Intercomparison – Final Report of Phase I and Phase II : Phase I : Fédération de Russie, 1995–1997 ; Phase II : États-Unis, 8–26 septembre 1995. Phase I : A. Balagurov, A. Kats, N. Krestyannikova, Phase II : F. Schmidlin, OMM/TD-No. 1305 (2006).
Radiosondes	90	WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Final Report, Alcantâra, Brésil, 20 mai – 10 juin 2001, R. da Silveira, G. F. Fisc, L.A. Machado, A.M. Dall'Antonia Jr., L.F. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques, J. Nash, OMM/TD-No. 1314 (2006).
Pyrhéliomètres	91	International Pyrheliometer Comparison – Final Report, Davos, Suisse, 26 septembre – 14 octobre 2005, W. Finsterle, OMM/TD-No. 1320 (2006).
Pyrhéliomètres	97	Second WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA II (Tokyo, 22 janvier – 2 février 2007), H. Sasaki, OMM/TD-No. 1494 (2009).
Pyranomètres	98	Sub-Regional Pyranometer Intercomparison of the RA VI members from South-Eastern Europe (Split, Croatie, 22 juillet – 6 août 2007), K. Premec, OMM/TD-No. 1501 (2009).
Intensité des précipitations	99	WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges (Vigna di Valle, Italie, octobre 2007 – avril 2009), E. Vuerich, C. Monesi, L. Lanza, L. Stagi, E. Lanzinger, OMM/TD-No. 1504 (2009).
Abris météorologiques et humidité	106	WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments, Ghardaïa, Algérie, novembre 2008–octobre 2009. Rapport final, M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy, M. Mezred, OMM/TD No. 1579 (2011).
Radiosondes	107	WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems, Yangjiang, Chine, 12 juillet – 3 août 2010, J. Nash, T. Oakley, H. Vömel, LI Wei, OMM/TD-No. 1580 (2011).

a) Les rapports sur les Comparaisons internationales de pyrhéliomètres de l'OMM, établis tous les cinq ans sous la direction du Centre radiométrique mondial à Davos (Suisse), sont également distribués par l'OMM.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Commission électrotechnique internationale, 1990 : *Classification of Environmental Conditions*. IEC 721.
- Organisation internationale de normalisation, 1989a : *Règles d'échantillonnage pour les contrôles par attributs – Partie 1: Procédures d'échantillonnage pour les contrôles lot par lot, indexés d'après le niveau de qualité acceptable (NQA)*. ISO 2859 1: 1989.
- Organisation internationale de normalisation, 1989b : *Règles et tables d'échantillonnage pour les contrôles par mesures des pourcentages de non conformes*.
- Organisation internationale de normalisation, 2007 : *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*. Troisième édition, Guide ISO 99:2007.
- Hoehne, W.E., 1971 : *Standarding Functional Tests*. NOAA Technical Memorandum, NWS T&EL 12, Département américain du commerce, Sterling, Virginie.
- Hoehne, W.E., 1972 : Standardizing functional tests. *Texte préliminaire du deuxième Symposium sur les observations et les instruments météorologiques*, American Meteorological Society, p. 161-165.
- Hoehne, W.E., 1977 : *Progress and Results of Functional Testing*. NOAA Technical Memorandum NWS T&EL 15, Département américain du commerce, Sterling, Virginie.
- National Weather Service, 1980 : *Natural Environmental Testing Criteria and Recommended Test Methodologies for a Proposed Standard for National Weather Service Equipment*. Département américain du commerce, Sterling, Virginie.
- National Weather Service, 1984 : *NWS Standard Environmental Criteria and Test Procedures*. Département américain du Commerce, Sterling, Virginie.
- Organisation météorologique mondiale/Conseil international des unions scientifiques : *Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements* (sous la direction de C. Fröhlich et de J. London). Série N° 7 des publications du Programme mondial de recherche sur le climat, WMO/TD No. 149, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989 : *Analysis of Instrument Calibration Methods Used by Members* (H. Doering). Rapport N° 45 sur les instruments et les méthodes d'observation, WMO/TD No. 310, Genève.

CHAPITRE 5

FORMATION DES SPÉCIALISTES DES INSTRUMENTS

5.1 GÉNÉRALITÉS

5.1.1 Introduction

Qu'elle soit théorique ou appliquée, la météorologie se fonde sur des séries continues de mesures effectuées à l'aide d'instruments et de systèmes de plus en plus élaborés. Aussi le présent chapitre traite-t-il de la formation professionnelle des spécialistes de la planification, des spécifications, de la conception, de l'installation, de la mise en service et de l'entretien des instruments météorologiques et des systèmes de télédétection utilisés en météorologie. Il s'adresse aux cadres techniques et aux formateurs mais aussi et surtout aux spécialistes des instruments qui veulent progresser dans leur profession.

Pour que le Système mondial d'observation de l'OMM puisse produire des données d'une qualité uniformément élevée dans les délais impartis et selon un rapport coût-efficacité acceptable, tous les pays Membres doivent disposer des techniques appropriées indispensables et donc d'un personnel qualifié, d'où le caractère essentiel de la formation professionnelle. Mais les capacités techniques dans le domaine des instruments ne suffisent plus. La météorologie moderne requiert, outre une qualification technique, des techniciens qui soient capables de remplir les fonctions de planificateur et de chef de projet, qui possèdent des connaissances en télécommunications et en traitement de données, qui soient en mesure de préconiser des solutions techniques efficaces et qui soient compétents tant dans le domaine financier que dans celui de la gestion du personnel. Par conséquent, les programmes de formation qui s'adressent aux plus qualifiés des spécialistes des instruments et des ingénieurs en systèmes d'instruments météorologiques doivent examiner, outre les compétences en technologie moderne, les sujets les plus variés, y compris le développement personnel et les aptitudes à la gestion.

De nombreux pays ont créé des centres régionaux de formation professionnelle sous les auspices de l'OMM. Bon nombre de ces centres proposent des cours de formation sur divers aspects du fonctionnement et de la gestion des instruments et des systèmes d'instruments. Leur liste figure à l'annexe au présent chapitre. Des centres régionaux d'instruments ont aussi été installés

à de nombreux endroits et certains d'entre eux peuvent assurer des activités de formation. Leurs coordonnées et l'énoncé de leurs attributions figurent à l'Annexe 1.A du chapitre 1 de la Partie I et à l'Annexe 4.A du chapitre 4 de la Partie II, et il en est brièvement question dans les sections 5.5.1.2 et 5.5.1.3.

5.1.2 Transfert de technologie

La formation professionnelle est primordiale pour le transfert de technologie en tant que processus de croissance opérant par l'apport de nouvelles ressources techniques pour améliorer la qualité et réduire les coûts de fonctionnement. La mise en place de nouvelles ressources et, par la suite, leur exploitation et les opérations d'entretien réclament de nouvelles qualifications. Pour ce qui concerne le renforcement des capacités, cette dimension humaine revêt davantage d'importance que le matériel technique.

Comme la météorologie intéresse l'ensemble de la planète, le transfert de techniques vise en particulier à combler les retards qu'accusent les pays en développement. Il convient donc de toujours garder à l'esprit les objectifs suivants : concevoir des stratégies, des programmes et des ressources de formation de qualité qui permettent aux pays en développement de se doter d'infrastructures techniques et de ressources humaines capables de subvenir aux besoins nationaux.

5.1.3 Application d'instruments météorologiques à tous les utilisateurs

Le présent chapitre traite de la formation professionnelle principalement du point de vue des Services hydrométéorologiques nationaux. Les mêmes principes s'appliquent cependant aussi à toutes les organisations appelées à effectuer des mesures météorologiques, qu'elles forment leur personnel ou qu'elles recrutent un personnel qualifié. Les avantages à tirer d'une formation professionnelle garantissant l'application de modes opératoires de mesure normalisés ainsi que la meilleure efficacité possible quant à l'utilisation et à l'entretien du matériel sont ceux qu'on retrouve dans toutes les sciences fondées sur l'observation.

5.2

FORMATION PROFESSIONNELLE EN RÉPONSE AUX BESOINS DE L'EXPLOITATION

5.2.1

Théorie et pratique

Les mesures effectuées à l'aide de systèmes d'instruments reposent sur l'application de principes physiques (l'expansion thermique du mercure, par exemple). Les variables atmosphériques mesurées sont transmises sous une forme normalisée qui correspond aux exigences pratiques de l'utilisateur, par exemple une trace enregistrée sur un diagramme ou un signal électrique d'entrée pour une station météorologique automatique. Le principe théorique expliquant le processus de mesure doit aussi tenir compte du rapport entre l'instrument de mesure et la grandeur à mesurer (la représentativité ou «exposition») et des erreurs imputables aux instruments ou aux observations qui entachent toutes les mesures. Souvent les données obtenues par mesurage subissent ensuite un traitement, puis sont codées de façon plus ou moins complexe (par exemple : réduction de la pression atmosphérique au niveau moyen de la mer ou élaboration de messages d'observation en altitude à partir de radiosondages), ce qui exige encore d'autres connaissances théoriques.

Le mesurage exige aussi des connaissances et une expérience pratiques lorsqu'il s'agit d'installer et de régler des instruments pour obtenir des mesures normalisées, de veiller à ce que ceux-ci fonctionnent en toute sécurité et avec exactitude et de procéder aux calculs ou au codage des données avec le moins d'erreurs possible.

L'acquisition de données d'une qualité établie est donc le résultat d'une synthèse de connaissances théoriques et pratiques. Le personnel chargé de l'exploitation et de la gestion des systèmes d'instruments doit posséder des connaissances, tant théoriques que pratiques, en adéquation avec la complexité et la portée de son travail. Les ingénieurs spécialisés dans la conception ou l'entretien des systèmes d'instruments complexes disposent d'un niveau de qualification théorique et pratique particulièrement élevé.

5.2.2

Adéquation des qualifications aux tâches à accomplir

Les organisations doivent veiller à ce que leur personnel soit dûment qualifié et compétent (et qu'il a donc reçu une formation appropriée), mais aussi en nombre suffisant pour mener à bien l'ensemble des tâches à accomplir; elles doivent s'assurer en outre que leurs sous-traitants en font de même. Par

exemple, la formation requise pour relever la température de l'air dans un abri Stevenson se situe au bas de l'échelle des qualifications, tandis qu'il va de soi que le personnel devra suivre une formation théorique et pratique bien plus poussée pour pouvoir établir le cahier des charges de systèmes tels les stations météorologiques automatiques, les récepteurs de satellites météorologiques et les radars, installer ces systèmes et en assurer le fonctionnement et l'entretien.

Il s'avère par conséquent fort utile d'appliquer une classification des niveaux de qualification en fonction des besoins en matière d'exploitation, d'emploi et de formation. Les niveaux de qualification définis pour l'enseignement technique à l'échelle nationale constituent des points de repère importants en la matière. Afin d'aider tous les pays à parvenir à une qualité uniforme lors de l'acquisition et du traitement des données météorologiques, l'OMM recommande l'adoption de sa propre classification du personnel, qui comprend, pour chaque niveau, les fonctions à remplir avec compétence.

5.2.3

Classification OMM du personnel

Le système de classification de l'OMM¹ définit deux grandes catégories de personnel: les professionnels diplômés et les techniciens (OMM (2002a)). Pour le personnel de la météorologie et de l'hydrologie, ces catégories sont désignées ainsi: météorologue et technicien en météorologie; hydrologue et technicien en hydrologie. Le programme d'enseignement recommandé pour chaque classe inclut une composante importante relative aux instruments et aux méthodes d'observation, liée à l'enseignement, à la formation professionnelle et aux fonctions attendues à ce niveau. En outre, la classification OMM du personnel établit des directives quant au contenu du travail des spécialistes des instruments, ainsi qu'à leur niveau de qualification et de compétence. On trouvera dans la section 7.3 de l'ouvrage OMM (2002a) un exemple des compétences requises, tandis que l'ouvrage OMM (2002b) offre des exemples détaillés de programmes d'enseignement pour la formation initiale et la spécialisation du personnel de la météorologie. Ces directives permettent de concevoir et d'interpréter correctement les programmes d'études et les cours de formation, de déceler les lacunes dans les compétences et d'équilibrer les compétences techniques nationales.

¹ Système approuvé par le Conseil exécutif de l'OMM à sa cinquantième session (1998) et approuvé par le Congrès météorologique mondial à sa treizième session (1999).

5.3 FORMATION PROFESSIONNELLE QUELQUES PRINCIPES GÉNÉRAUX

5.3.1 Principes de gestion

5.3.1.1 Plan de gestion du personnel

Il importe que les Services météorologiques nationaux disposent d'un plan de gestion du personnel qui mette en évidence le rôle des spécialistes des instruments dans la planification, l'élaboration et l'exploitation de programmes d'observation météorologique appropriés et économiques. Ce plan doit comprendre la liste de tous les membres du personnel spécialisé dans les instruments, avec leur niveau de classification (OMM (2002a)). Il permet de déterminer les besoins des Services en matière de compétences et d'y répondre par le recrutement ou la formation.

5.3.1.2 Maintien de l'effectif

Tout doit être mis en œuvre pour conserver des compétences techniques rares dans le domaine des instruments grâce au maintien d'un bon environnement de travail en veillant à ce que le niveau technique demeure stimulant, et pour offrir des possibilités d'avancement dans la carrière et proposer des salaires comparables à ceux d'autres métiers techniques de même niveau au sein des Services météorologiques ou à l'extérieur de ceux-ci.

5.3.1.3 Perfectionnement du personnel

La formation professionnelle doit faire partie intégrante du plan de gestion du personnel. L'application de nouvelles techniques et le rééquipement créent des besoins nouveaux en matière de compétences. Pour répondre à ces besoins, les employés recrutés seront formés en fonction de leur expérience et l'on pourra aussi proposer un perfectionnement au personnel en place. Ce type de formation est aussi un moyen d'avancement dans la carrière. Afin de pouvoir organiser le perfectionnement du personnel de façon méthodique, le service chargé de la formation professionnelle tiendra à jour pour chaque membre du personnel un profil de carrière faisant état de la formation reçue, des qualifications et de l'avancement.

5.3.1.4 Équilibre dans la formation

Les programmes nationaux de formation professionnelle devraient permettre d'assurer un équilibre des compétences dans l'ensemble des classes de personnel spécialisé, compte tenu des différentes phases de la formation (formation de base, formation complémentaire et recyclage), et contribuer ainsi à l'autonomie de l'infrastructure technique nationale.

5.3.2 Objectifs des programmes de formation professionnelle

Pour tirer le maximum d'avantages de la formation professionnelle, il est indispensable de définir clairement les buts et les objectifs sur lesquels reposeront les plans de formation, les programmes d'études et les budgets de dépenses. Il est possible de s'inspirer des buts et objectifs stratégiques indiqués ci-après pour ce qui concerne la formation des spécialistes des instruments.

5.3.2.1 Pour les cadres

Par la formation professionnelle des spécialistes des instruments, les cadres visent notamment :

- a) À améliorer et à maintenir la qualité de l'information dans tous les programmes d'observation météorologique ;
- b) À permettre aux Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) de parvenir à l'autonomie pour ce qui est des connaissances et des compétences indispensables à la planification, à la mise en œuvre et à l'exécution efficaces de programmes d'acquisition de données météorologiques ; à leur permettre aussi de mettre sur pied des services d'entretien qui leur garantissent une fiabilité, une exactitude et une rentabilité maximales dans l'exploitation des systèmes d'instruments ;
- c) À tirer pleinement parti des fonds investis dans les systèmes d'instruments tout au long de la durée de vie utile optimale de ces systèmes.

5.3.2.2 Pour les formateurs

Il convient de concevoir des cours de formation en se donnant les buts suivants :

- a) Proposer des programmes de formation équilibrés répondant aux besoins définis dans les pays de chaque Région en matière de compétences aux différents niveaux de classification ;
- b) Assurer avec efficacité le transfert des connaissances et le perfectionnement des compétences dans les Services météorologiques nationaux grâce à des enseignants qualifiés, à des moyens et installations de formation adéquats et à des méthodes d'enseignement correctes ;
- c) Assurer la vérification de l'efficacité de la formation professionnelle en appliquant des modes d'évaluation et de suivi bien adaptés ;
- d) Proposer des formations aux coûts minimaux nécessaires.

5.3.2.3 Pour les formateurs et les spécialistes des instruments

L'objectif global est de former des spécialistes des instruments et des ingénieurs capables (suivant leur niveau de qualification) de remplir les fonctions suivantes :

- a) Évaluer, pour tous les types de mesures instrumentales, leur application, leur utilité et leur exactitude ;
- b) Comprendre et appliquer les principes qui régissent le choix de l'emplacement des parcs d'instruments et l'exposition des instruments pour produire des jeux de données représentatifs, homogènes et compatibles entre eux ;
- c) Acquérir les connaissances et les compétences leur permettant d'exécuter des opérations d'installation, de réglage et d'entretien et aussi d'assurer un service d'entretien qui garantisse la fiabilité, l'exactitude et la rentabilité maximales des instruments et systèmes météorologiques ;
- d) Diagnostiquer rapidement et rationnellement les pannes selon les symptômes observés et pouvoir systématiquement remonter à leurs causes et y remédier ;
- e) Comprendre les sources d'erreurs dans les mesures et être compétents en matière d'utilisation d'étaillons et de modes opératoires d'étalonnage afin de réduire au minimum les erreurs systématiques ;
- f) Suivre les progrès techniques et leurs applications possibles et acquérir de nouvelles connaissances et compétences en participant à des cours spéciaux ou de recyclage ;
- g) Planifier et concevoir des réseaux d'acquisition de données et gérer les budgets et le personnel technique ;
- h) Diriger des projets importants par les ressources financières, matérielles et humaines engagées et par leur complexité technique ;
- i) Modifier, améliorer, concevoir et fabriquer des instruments pour répondre à des besoins particuliers ;
- j) Concevoir et appliquer des systèmes et des logiciels informatiques et de télécommunications pour piloter des mesures, traiter des données instrumentales brutes en vue de leur donner diverses formes et transmettre des messages codés.

5.3.3 Formation à la qualité

L'acquisition de données météorologiques est une activité complexe et onéreuse nécessitant des ressources humaines et matérielles ainsi que des moyens de communication et de calcul. Il faut donc veiller à tirer le maximum d'avantages de l'information ainsi obtenue pour un minimum de ressources financières et humaines engagées.

En matière d'acquisition de données, la qualité consiste à garantir dans les délais impartis un flux de données météorologiques représentatives et exactes dans les centres nationaux de traitement, et ce au

moindre coût. À chacune des étapes du processus de formation technique, il y a lieu d'inculquer à chacun la conscience de sa propre influence sur la qualité des produits finals. En tant que discipline, la gestion de la qualité totale (Walton (1986) et Imai (1986)) permet d'examiner dans tout ce qui entoure le mesurement (applications, modes opératoires, instruments et personnel) chaque élément pouvant influer sur la qualité. Sous cet angle, l'acquisition de données est étudiée en tant que système ou que série de processus. Les éléments critiques de chaque processus, les retards par exemple, sont mesurés et la variabilité du processus est établie statistiquement. Une petite équipe connaissant bien le processus intervient à l'aide d'outils de résolution de problèmes afin de réduire la variabilité du processus et donc d'améliorer la qualité. Les processus sont ainsi affinés continuellement par des améliorations progressives.

La publication OMM (1990) propose une liste de contrôle des divers facteurs sous les en-têtes suivants :

- a) Recrutement et formation du personnel ;
- b) Caractéristiques, conception et mise au point du matériel ;
- c) Installation des instruments ;
- d) Entretien du matériel ;
- e) Étalonnage des instruments.

Pour les spécialistes des instruments, tous ces facteurs ont une influence sur la qualité des données. Cette liste peut servir aux cadres pour examiner les domaines qui relèvent de leurs compétences et déceler les faiblesses, aux formateurs, dans les cours sur les notions de gestion de la qualité totale, et au personnel en général pour lui rappeler les facteurs sur lesquels il peut agir compte tenu de ses connaissances et de ses compétences afin d'améliorer la qualité globale des données.

L'Organisation internationale de normalisation a établi des systèmes formels de qualité, qu'elle définit dans les normes de la série ISO 9000 (voir ISO (1994a et 1994b)), et selon lesquels des vérificateurs indépendants certifient que des organisations délivrent des produits ou des services qui correspondent aux exigences de la clientèle en matière de qualité. Ces systèmes reposent en grande partie sur la formation aux techniques de gestion de la qualité.

5.3.4 Modes d'apprentissage

5.3.4.1 Cadre d'apprentissage

L'apprentissage est un processus très personnel variant en fonction de l'individu, de ses besoins et de ses intérêts. L'individu se sent motivé par les avantages qu'il peut tirer de ce processus, comme une

augmentation de salaire, mais d'autres éléments exercent aussi une forte motivation: la satisfaction professionnelle, le sentiment de participation, l'accomplissement personnel, l'acquisition d'un certain pouvoir ou d'une certaine influence et la reconnaissance par les pairs et les supérieurs. L'individu se sent donc motivé par de meilleures performances dans le travail et de meilleurs rapports avec autrui dans le milieu professionnel.

L'apprentissage est un processus actif selon lequel le stagiaire réagit au milieu et à l'activité de formation. Comme il s'engage sur le plan mental, physique et émotionnel, le stagiaire subit un changement de comportement. Un excès de tension mentale ou émotionnelle au cours du processus risque ainsi d'aller à l'encontre du but recherché.

Les formateurs et les cadres doivent tenter de stimuler et de promouvoir l'apprentissage en créant un climat physique et psychologique favorable et en mettant à profit des situations et des méthodes allant dans ce sens. Le cadre d'apprentissage doit permettre aux stagiaires de se sentir à l'aise et ne pas comporter d'éléments de distraction. Le climat psychologique peut varier en fonction du degré de motivation des stagiaires, du comportement de l'enseignant et du vocabulaire qu'il emploie, de l'affirmation des connaissances acquises au préalable, de la possibilité d'éviter les situations embarrassantes et le ridicule, du climat de confiance qui règne ou non et du choix des méthodes d'enseignement.

5.3.4.2 Principes importants

Voici quelques principes importants s'appliquant à l'enseignement :

- a) *Disponibilité* : plus les stagiaires sont intéressés et disposés à apprendre, plus l'apprentissage est rapide ;
- b) *Objectifs* : les objectifs de la formation (y compris les critères de rendement) doivent être clairs dans l'esprit des responsables et des intéressés ;
- c) *Participation* : l'apprentissage est plus efficace lorsque les stagiaires progressent d'eux-mêmes, notamment pour résoudre les problèmes posés, et qu'on ne se contente pas de leur montrer comment faire et de leur fournir les réponses, ce qui les laisse passifs ;
- d) *Associations mentales* : l'apprentissage doit établir des associations avec les expériences passées, faire ressortir similitudes et différences ;
- e) *Rythme d'apprentissage* : la formation devrait avancer à la vitesse à laquelle un individu peut apprendre (à confirmer à l'aide de tests), les connaissances semblant être mieux retenues lorsqu'elles sont acquises au cours de plusieurs

séances d'apprentissage courtes plutôt que d'une séance relativement longue ;

- f) *Renforcement* : exercices et répétitions sont utiles pour inculquer de nouvelles connaissances ;
- g) *Intensité* : par l'intensité d'une situation frappante ou saisissante, on capte mieux l'imagination des stagiaires et l'effet mnémonique en est plus important ;
- h) *Efficacité* : le fait d'éprouver une satisfaction est plus positif pour l'apprentissage que celui d'éprouver de l'embarras ou de l'agacement. L'approbation stimule l'apprentissage ;
- i) *Appui* : le superviseur du stagiaire doit avoir une attitude positive au sujet de la formation suivie et doit y apporter son soutien et la renforcer ;
- j) *Planification et évaluation* : la formation doit être planifiée, dispensée et évaluée méthodiquement en fonction des besoins de l'organisation.

5.3.4.3 Application de différentes méthodes

Le rythme d'apprentissage de chacun varie au sein d'un groupe. Certaines méthodes d'enseignement (voir la section 5.4) conviendront à certains mieux qu'à d'autres et se révéleront plus efficaces selon les circonstances. S'il met en pratique différentes méthodes et ressources pédagogiques, le formateur aidera le groupe à apprendre plus rapidement.

Des recherches (Moss (1987)) ont montré que nos sens contribuent inégalement au processus d'apprentissage :

- a) La vue à 83 % ;
- b) L'ouïe à 11 % ;
- c) Les autres sens à 6 %.

La meilleure façon d'apprendre est cependant la pratique. Voici une liste de méthodes et de moyens pédagogiques classés par ordre général décroissant d'efficacité :

- a) L'expérience pratique réelle ;
- b) L'expérience pratique simulée ;
- c) Les démonstrations et les discussions ;
- d) Les modèles physiques et les textes ;
- e) Les films, les vidéos, les animations sur ordinateur ;
- f) Les graphiques, les diagrammes, les photographies ;
- g) Les textes écrits ;
- h) Les cours magistraux et les exposés.

Il est évidemment possible de combiner ces différentes méthodes. Un bon cours magistral peut intégrer certaines autres méthodes.

Les méthodes classiques d'enseignement reposent en grande partie sur la parole et l'écrit alors qu'il est

prouvé que les méthodes visuelles et l'expérience pratique sont bien plus efficaces.

Pour former des spécialistes des instruments, on peut tirer parti de toutes sortes de méthodes et de moyens. Les éléments théoriques du mesurage et de la conception des instruments sont enseignés lors de cours magistraux reposant sur des textes et des formules, les formateurs pouvant s'aider de graphiques et de diagrammes. Pour inculquer des connaissances pratiques sur les systèmes d'instruments, et notamment sur leur fonctionnement, leur entretien et leur étalonnage, les formateurs tirent parti de photographies accompagnées de textes, de films ou de vidéos de réglages manuels, de modèles qu'il est possible de démonter, de démonstrations, pour en venir enfin à la pratique sur des systèmes en exploitation. Il est possible aussi de simuler des pratiques ou des modes d'utilisation dangereux.

5.3.5 Perfectionnement des compétences personnelles

Un service technique spécialisé dans les systèmes d'instruments météorologiques requiert des individus possédant les compétences voulues dans divers domaines techniques, mais ayant aussi de bonnes connaissances générales et étant capables de bien s'exprimer tant oralement que par écrit. Il est indispensable, particulièrement pour les cadres, de savoir bien communiquer pour appuyer des programmes techniques ou argumenter en leur faveur. Il convient de proposer aux techniciens qualifiés faisant preuve des capacités voulues des cours de formation qui leur permettront d'influer davantage sur les décisions qui touchent à l'évolution de leur Service météorologique.

Les individus davantage portés sur les chiffres et sur les aspects pratiques et manuels ont souvent tendance à moins bien communiquer oralement et par écrit. Chaque année, lors du contrôle personnel du rendement, les cadres devraient saisir les occasions qui peuvent se présenter pour améliorer les compétences des membres du personnel qui correspondent à la description qui précède, notamment en leur proposant de suivre des cours spéciaux portant par exemple sur l'art de s'exprimer en public, sur la négociation, sur la rédaction de lettres et de rapports ou sur l'affirmation de soi. Certains employés pourront avoir besoin d'une aide pour apprendre une deuxième langue afin de poursuivre leur formation.

5.3.6 Formation à la gestion

En ingénierie, il importe de posséder de bonnes connaissances de la gestion. Par gestion, on entend notamment la gestion du temps, la motivation, la

supervision et l'évaluation du personnel (y compris l'élément formation), la gestion de projets (évaluation des ressources, budgets, temps, personnel et matériel, planification), la résolution de problèmes, la gestion de la qualité et la communication verbale et écrite. Il convient de reconnaître les spécialistes des instruments montrant des aptitudes à l'encadrement afin de leur proposer des cours de formation à la gestion à un moment approprié de leur carrière.

De nos jours, les gestionnaires ont la possibilité de se servir d'un ordinateur personnel et de manier des logiciels bureautiques ou techniques, y compris le traitement de texte, les tableurs, les bases de données, l'analyse statistique avec graphiques, le dessin industriel, le tracé d'organigrammes et la gestion de projets. Des cours de formation à l'utilisation de ces outils pourront améliorer notablement la productivité personnelle.

5.3.7 Éducation permanente

5.3.7.1 Les trois phases de la formation

Tout au long de leur carrière, les spécialistes des instruments doivent s'attendre à participer à des cycles répétés de formation, qu'il s'agisse d'études structurées, de formation en cours d'emploi ou encore d'autoformation. Il est possible de distinguer trois phases dans la formation :

- a) Une formation de base au cours de laquelle sont acquis les éléments théoriques et pratiques généraux correspondant aux différents niveaux de classification ;
- b) Une formation complémentaire ou spécialisée au cours de laquelle sont acquises des connaissances sur certaines techniques et certains matériels, en particulier pour renforcer les éléments de base ;
- c) Un recyclage qui permet au spécialiste, plusieurs années après sa formation théorique, de mettre à jour ses connaissances, notamment en ce qui concerne les techniques et le matériel récents.

5.3.7.2 Formation de base

Les spécialistes des instruments reçoivent leur formation technique de base en partie dans un établissement technique extérieur et en partie dans le centre de formation du SMHN, où ils suivent notamment un cours général sur les instruments météorologiques. Il faut noter que, par une formation technique ou d'ingénieur, on peut accéder aux deux classes de personnel de l'OMM.

5.3.7.3 Formation spécialisée

La formation complémentaire est répartie sur quelques années au cours desquelles le spécialiste suit

des cours de spécialisation sur certains systèmes (par exemple les stations météorologiques automatiques ou les radars) ou encore dans des disciplines telles que les logiciels informatiques ou la gestion. Au cours de cette phase, on fait davantage appel à des ressources extérieures, y compris des possibilités de formation financée par l'OMM.

5.3.7.4 Recyclage

Tout au long de leur carrière, les spécialistes des instruments sont appelés à suivre périodiquement des cours de mise à jour de leurs connaissances compte tenu de l'évolution des instruments et des techniques, ainsi que d'autres cours complémentaires.

Les trois phases de la formation sous-entendent une progression. Les cours sont suivis en fonction des connaissances acquises lors de précédents cours.

d'utiliser un formulaire d'analyse des tâches pour définir comment un travail doit être accompli. Ce formulaire peut ensuite servir au formateur pour les besoins de la formation, puis au stagiaire comme liste de contrôle. On inscrit d'abord les objectifs du travail à accomplir et les critères de rendement à atteindre. Le travail est ensuite décomposé en étapes ou phases logiques de taille pratique, notamment sous la forme d'un tableau dont les colonnes s'intitulent comme suit par exemple :

- a) *Étapes* (ce qu'il faut exécuter) : elles sont numérotées ; brève description commençant par un verbe d'action ;
- b) *Méthodes* (comment l'exécuter) : méthode et matériel à utiliser ou compétences nécessaires ;
- c) *Contrôles* (critères d'exécution) : énoncé qualitatif ou référence à une spécification, à un test ou à un contrôle à proprement parler ;
- d) *Raisons* (but recherché) : courte explication du but de chaque étape.

Pour bien montrer comment s'imbriquent les différentes étapes d'un travail à accomplir, il peut être bon de les indiquer sur un organigramme, en particulier lorsque l'ordre des étapes est important ou que le mode opératoire présente des ramifications.

5.4.3 Planification des séances de formation

Comme l'indique la figure ci-après, il convient de distinguer quatre étapes dans le processus de formation :

- a) *La planification* :
 - Examiner les objectifs de la formation fixés par l'organisme employeur ou par l'organisme qui fixe les critères en la matière (par exemple l'OMM) ;
 - Analyser les caractéristiques du corps des connaissances, de la tâche ou de la compétence qui constitue le sujet de la séance ;
 - Évaluer le niveau des stagiaires : leurs qualifications, leur expérience professionnelle, leurs aptitudes linguistiques, leurs problèmes particuliers ;
 - Évaluer le niveau de qualification requis : quels stagiaires pourraient avoir besoin d'une attention particulière ?
 - Fixer les objectifs de la séance : quels sont les résultats à atteindre et comment les mesurer ?
- b) *La préparation* :
 - Choisir le contenu du cours : rassembler l'information, l'organiser en une suite logique ;
 - Décider des méthodes et des moyens pédagogiques à employer qui correspondent au sujet traité pour éveiller l'intérêt des stagiaires et retenir leur attention (voir la section 5.4.5) ;

5.4 LE PROCESSUS DE FORMATION

5.4.1 Rôle du formateur

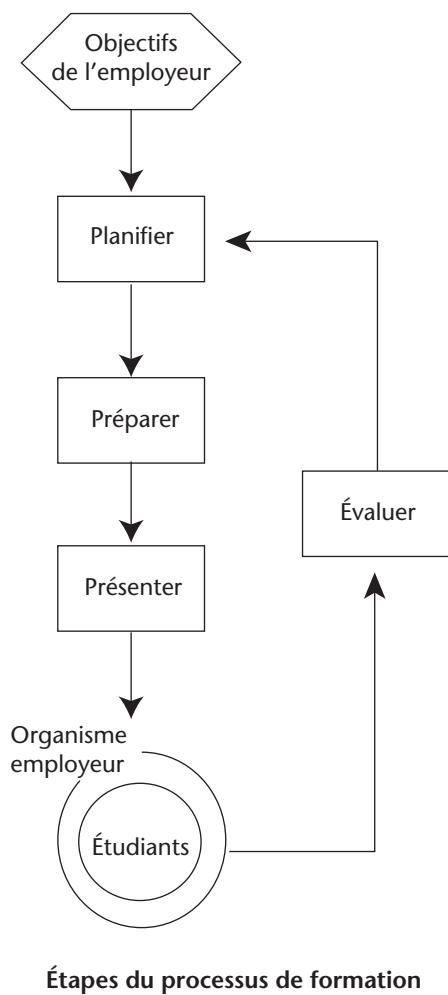
À certains moments de leur carrière, la plupart des spécialistes des instruments sont appelés à tenir le rôle important et motivant de formateur. Certains en font leur métier, dans leur domaine de spécialisation. Tous doivent savoir quelles sont les qualités d'un bon formateur.

Un bon formateur doit avoir à cœur la qualité des résultats qu'il obtient, connaître parfaitement ses domaines de spécialisation et savoir communiquer. Il doit savoir s'identifier aux stagiaires, faire preuve de patience et de tolérance, être disposé à encourager et à féliciter autrui, faire preuve de souplesse et d'imagination et maîtriser différentes techniques pédagogiques.

Un bon formateur fixe des objectifs clairs et sait organiser et préparer ses cours avec soin. Il tient soigneusement à jour des dossiers sur les directives relatives à la formation, les programmes d'études, les notes de cours, les cours dispensés, avec les résultats obtenus, et les budgets et les dépenses. Il obtient des stagiaires des commentaires sincères sur son travail et doit être disposé à modifier son approche pédagogique. Il doit s'attendre à apprendre lui-même de façon permanente.

5.4.2 Analyse des tâches

Un spécialiste des instruments doit recevoir une formation lui permettant d'exécuter de nombreuses tâches répétitives ou complexes en ce qui concerne l'installation, l'entretien et l'étalement des instruments, et parfois leur fabrication. Il est possible



- Établir un plan de séance détaillé comprenant le temps à consacrer à chaque activité ;
 - Prévoir l'évaluation : quelles sont les informations requises et comment les recueillir ? Choisir une méthode et préparer les questions ou le devoir.
- c) *La présentation :*
- Présenter le cours en suivant le plan de séance ;
 - Favoriser un apprentissage actif et encourager les stagiaires à participer ;
 - Appliquer diverses méthodes pédagogiques ;
 - Faire des démonstrations et employer des aides visuelles.
- d) *L'évaluation :*
- Effectuer l'évaluation prévue en fonction des objectifs fixés ;
 - Résumer les résultats ;
 - Évaluer l'efficacité de la séance en fonction des résultats de l'évaluation ;
 - Songer à améliorer le contenu et la présentation ;
 - Rédiger des conclusions ;

- Recueillir les commentaires des stagiaires et utiliser l'information pour la planification de la prochaine séance.

La formation sera d'autant plus efficace que ces stages seront organisés avec soin et méthode.

5.4.4 Efficacité de la formation

5.4.4.1 Formation ciblée

Compte tenu des ressources limitées allouées à la formation, il convient de rechercher un maximum d'efficacité. Il y a lieu pour cela de bien cibler les cours et les ressources en formation afin d'optimiser les avantages que procure la formation du personnel adéquat au meilleur moment possible. Dans le cas contraire, une formation trop succincte pourrait entraîner un gaspillage de ressources. De même, le fait de faire suivre à des cadres un cours de techniciens d'entretien paraîtrait peu approprié et il serait inutile de former un personnel douze mois avant qu'il puisse avoir accès à une nouvelle technique.

Il convient de sélectionner les possibilités de formation et les méthodes pédagogiques qui correspondent le mieux aux critères des connaissances et des compétences à acquérir ainsi qu'aux besoins des stagiaires en fonction de leurs qualifications et de leurs pays d'origine. Il y a lieu d'évaluer la formation pour garantir une efficacité maximale.

5.4.4.2 Évaluation de la formation

L'évaluation est le processus qui consiste à recueillir certains éléments d'information et à les transmettre à ceux qui peuvent influer sur le futur rendement de la formation. Les méthodes d'évaluation diffèrent en fonction du destinataire de l'information :

- a) L'OMM s'attache à améliorer la qualité des données recueillies dans son Système mondial d'observation. Elle élabore des programmes de formation professionnelle, crée des fonds et utilise les services d'experts principalement pour renforcer les bases de compétence des pays en développement ;
- b) Les Services météorologiques nationaux ont besoin de données météorologiques de qualité. Ils veillent aux capacités globales de leurs services chargés de l'acquisition de données et de certaines tâches touchant aux instruments, compte tenu des contraintes découlant de leurs effectifs. Ils s'intéressent au budget et au rapport coûts-avantages des programmes de formation ;
- c) Les services de formation professionnelle et les centres régionaux de formation professionnelle s'emploient à établir des programmes de formation qui répondent aux objectifs fixés

- compte tenu du budget établi. Les formateurs ont besoin de savoir dans quelle mesure les méthodes pédagogiques qu'ils emploient permettent d'atteindre ces objectifs et comment les améliorer s'il y a lieu ;
- d) Les cadres techniques se préoccupent de posséder les compétences leur permettant d'assumer leurs responsabilités selon les normes applicables, sans perte de temps ni gaspillage de matériel;
 - e) Les stagiaires s'intéressent directement aux avantages et à la satisfaction professionnelle qu'ils peuvent tirer d'une amélioration de leurs compétences. Ils escomptent que les cours de formation répondront à leurs attentes et à leurs besoins.

Il faut donc évaluer l'efficacité de la formation à plusieurs niveaux. Les centres nationaux et régionaux de formation professionnelle pourront évaluer leurs programmes tous les ans ou tous les trois ans et établir des comparaisons entre le nombre de stagiaires des différents cours et de stagiaires ayant obtenu la note de passage et les budgets et objectifs qui ont été fixés au début de chaque période. Les formateurs auront besoin d'évaluer la pertinence et l'efficacité du contenu et de la présentation de leurs cours.

5.4.4.3 Types d'évaluations

Voici divers types d'évaluations applicables :

- a) Il n'est pas question de mesurer l'efficacité dans un rapport de formation. Un tel rapport est un énoncé de faits comprenant par exemple le type et le nombre de cours proposés, leurs dates et leur durée, le nombre de stagiaires qui ont suivi les cours et de ceux qui ont réussi et le coût total de la formation. Dans certaines situations, il y a lieu d'établir un rapport individuel sur les capacités décelées ;
- b) L'évaluation des réactions mesure la réaction des stagiaires au programme de formation. Il peut s'agir d'un questionnaire écrit proposé aux stagiaires à la fin d'un cours afin que ceux-ci attribuent des notes sur la pertinence, le contenu, les méthodes pédagogiques, les aides didactiques, la présentation et l'administration. Par ce moyen, les stagiaires n'ont pas la possibilité d'améliorer la formation qu'ils sont en train de suivre. C'est pourquoi il faudrait prévoir dans tous les cours de formation des périodes régulièrement espacées de discussions en groupe permettant aux stagiaires de faire des remarques. Cela permettrait aux formateurs de déceler les problèmes relatifs à la formation et les besoins particuliers de certains stagiaires et d'en tenir compte ;
- c) L'évaluation de l'apprentissage mesure les nouvelles connaissances et compétences acquises

par les stagiaires, de préférence par rapport aux résultats d'un test antérieur au cours. Différentes formes d'épreuves écrites se prêtent bien à ce type d'évaluation des connaissances (composition, questions à réponses courtes, questions vrai-faux, questions à choix multiple, dessin de diagramme ou d'organigramme). Il peut se révéler utile de donner aux stagiaires le moyen d'évaluer et de noter eux-mêmes leurs connaissances. Il est préférable de contrôler l'acquisition des compétences par une épreuve pratique bien déterminée ou, dans le cas d'une formation en cours d'emploi, par la simple observation du travail du stagiaire (OMM (1990)). L'évaluateur peut se servir à cette fin d'une liste de contrôle des actions et des compétences requises (formulaire d'observation) dans l'accomplissement d'une tâche particulière ;

- d) L'évaluation du rendement mesure comment, quelque temps après une formation, le rendement du stagiaire a évolué dans son emploi, de préférence par rapport aux résultats d'un test antérieur à la formation. Cette évaluation peut être réalisée par l'employeur, au moins six semaines après la fin de la formation, à l'aide d'un formulaire d'observation par exemple. L'organisme de formation peut aussi effectuer une telle évaluation. Il suffit pour cela d'envoyer des questionnaires à remplir par l'employeur et le stagiaire ;
- e) L'évaluation des incidences mesure l'efficacité de la formation en déterminant l'évolution observée dans un organisme ou un groupe de travail. Ce type d'évaluation peut exiger une bonne planification, puisqu'il convient de recueillir des données de référence avant et après une formation. Les critères d'évaluation peuvent inclure par exemple les données de mauvaise qualité et le nombre d'éléments manquants dans les messages météorologiques, le temps nécessaire aux installations et le coût des installations.

5.4.4.4 Formation des formateurs

Les formateurs aussi ont besoin d'être formés, pour se tenir au courant des progrès techniques, pour apprendre à utiliser de nouvelles techniques et de nouveaux moyens pédagogiques et pour pouvoir jeter un œil nouveau sur leur travail. Les SMHN doivent prévoir dans leurs budgets annuels des fonds qui permettront au personnel de formation de saisir, éventuellement par rotation, les possibilités de formation qui se présenteront.

Les possibilités de formation sont variées : études personnelles, cours de durée limitée (notamment

sur les techniques pédagogiques) dispensés par des établissements techniques, congés d'études pour obtenir de meilleures qualifications, visites de fabricants de matériel météorologique, visites et détachements dans d'autres SMHN et d'autres centres régionaux d'instruments et participation à des conférences sur la formation ou sur des sujets techniques, organisées par l'OMM ou d'autres organisations.

5.4.5 **Méthodes et moyens pédagogiques**

La liste ci-après contient uniquement de courtes remarques pour rappeler ou montrer ce que permettent différentes méthodes pédagogiques. D'autres sources fournissent davantage de détails sur le sujet, notamment Moss (1987) et Craig (1987) :

- *Études de cas :*

- a) Un problème ou un projet de développement donné correspondant à la réalité est conçu pour être étudié individuellement ou souvent en équipe ;
- b) Il peut être demandé que les résultats soient présentés sous la forme d'une documentation en bonne et due forme, comme ce serait le cas dans une situation réelle.

- *Cours magistraux :*

- a) C'est la méthode la plus indiquée pour favoriser la compréhension d'éléments d'information transmis de préférence par écrit ou oralement : connaissances élémentaires, concepts théoriques, calculs, modes opératoires ;
- b) Compléter l'exposé par des moyens visuels et la distribution de documents écrits se révèle fort utile ;
- c) Il convient de consacrer suffisamment de temps aux questions et aux discussions ;
- d) Cette méthode est souvent excessivement passive pour le stagiaire.

- *Enseignement assisté par ordinateur :*

- a) Cette méthode repose sur la capacité de l'ordinateur personnel à stocker une grande quantité de textes et d'images que le logiciel utilisé organise en séquences d'apprentissage comprenant souvent des éléments d'interactivité auxquels le stagiaire accède à l'aide de menus et de boutons de sélection ;
- b) Fonctionnant par conditions logiques, branchement et bouclage circulaire, les programmes d'enseignement assisté par ordinateur simulent les processus d'apprentissage, puisqu'ils déterminent la matière à étudier en fonction des besoins du stagiaire, présentent les éléments d'information requis, contrôlent les

connaissances par des séries de questions et proposent des révisions jusqu'à l'obtention de réponses correctes ;

- c) Certains langages informatiques tels que Toolbook pour PC et HyperCard pour Macintosh sont conçus expressément pour élaborer et présenter des cours de formation interactifs en hypermédia ;
- d) Dotés d'écrans graphiques couleur, les systèmes modernes permettent de visualiser des diagrammes, des photographies et de courtes séquences vidéo ; une interface graphique améliore l'interactivité entre l'utilisateur et le programme ;
- e) Il est possible de simuler sur l'ordinateur des systèmes complets d'instruments météorologiques, pour les sondages en altitude par exemple ;
- f) Des systèmes perfectionnés peuvent comprendre des vidéodisques laser, des DVD ou des CD-ROM sur lesquels sont stockés de façon permanente des textes et des séquences vidéo en quantité importante ;
- g) Les coûts d'équipement en systèmes d'enseignement assisté par ordinateur, y compris l'élaboration de logiciels, varient énormément ; ces systèmes commencent à remplacer le matériel didactique multimédia et les aides de formation magnétoscopiques.

- *Cours par correspondance :*

- a) En général, les cours se présentent sous la forme de leçons accompagnées d'exercices ou de devoirs transmis au stagiaire par courrier, à intervalles réguliers ;
- b) L'enseignant note les devoirs et les renvoie au stagiaire avec la leçon suivante ;
- c) Les stagiaires ont parfois la possibilité de communiquer par téléphone avec l'enseignant pour lui faire part des difficultés qu'ils éprouvent ;
- d) Certains cours peuvent comprendre des cassettes audio ou vidéo, ou encore des disques informatiques, à condition que le stagiaire ait accès au matériel indispensable ;
- e) Le cours peut comporter un examen final qui se tient dans un centre de formation.

- *Démonstrations :*

- a) L'enseignant montre et explique des techniques soit en laboratoire soit en situation réelle de travail ;
- b) Il s'agit d'une étape obligatoire de la formation initiale aux modes opératoires manuels d'entretien et d'étalementage ;
- c) Les stagiaires doivent avoir la possibilité de répéter eux-mêmes les modes opératoires et de poser des questions.

• *Formation à distance :*

- a) Alors que le centre de formation et l'enseignant se trouvent à distance, les stagiaires suivent un cours de formation, en général à temps partiel, dans leur propre ville et en dehors des heures de travail ;
- b) Les études peuvent avoir lieu en groupe ou individuellement ;
- c) Certains établissements se spécialisent dans la formation à distance ;
- d) La formation à distance regroupe les cours par correspondance, le télé-enseignement et la formation à distance par téléconférence.

• *Formation à distance par téléconférence :*

- a) Un formateur communique avec une classe se trouvant à distance grâce à une liaison téléphonique spéciale. Les stagiaires étudient à partir d'un texte imprimé, chacun disposant d'un microphone qui lui permet de dialoguer avec le formateur. À cet effet, il est possible d'utiliser tout moyen de communication fiable approprié, y compris une liaison par satellite. La rentabilité d'une telle méthode soulève évidemment la question du coût des communications ;
- b) Des systèmes plus élaborés et plus coûteux permettent aux stagiaires de travailler sur des ordinateurs connectés en réseau, entre eux et avec celui du formateur à distance. Le formateur peut aussi donner son cours à partir d'un studio de télévision spécialement équipé. Son image est alors transmise sur un écran de télévision placé dans la classe, elle-même équipée d'une caméra et de micros pour que le formateur puisse voir et entendre les stagiaires.

• *Exercices pratiques et devoirs :*

- a) Ceux-ci sont souvent proposés aux stagiaires à la suite d'un exposé ou d'une démonstration ;
- b) Ils permettent aux stagiaires d'assimiler activement de nouvelles connaissances et de les mettre en pratique ;
- c) Un devoir peut exiger une recherche ou consister en une tâche pratique.

• *Expositions :*

- a) Elles regroupent un matériel et des modèles d'exposition que les stagiaires peuvent examiner ;
- b) Elles donnent aux stagiaires une vue d'ensemble lorsque les appareils utilisés en situation réelle sont trop complexes ou trop éloignés.

• *Études et visites sur le terrain :*

- a) Les stagiaires mettent en pratique des méthodes d'observation et étudient des systèmes d'instruments sur le terrain. Ils apprennent

d'autant plus que des activités d'installation, d'entretien et d'étalonnage ont lieu ;

- b) Des visites chez des fabricants de matériel météorologique et dans d'autres Services météorologiques permettent aux spécialistes d'élargir leurs connaissances techniques.

• *Discussion et résolution de problèmes en groupe :*

- a) La classe est divisée en petits groupes de quatre à six personnes ;
- b) Le chef de groupe encourage tous les membres du groupe à participer ;
- c) Un rapporteur note les idées sur un tableau à la vue de tout le groupe ;
- d) Au cours d'une séance collective de créativité, toutes les idées sont d'abord acceptées sans critiques ; le groupe les examine ensuite dans le détail et les classe par ordre d'utilité.

• *Affectation par rotation ou affectation provisoire :*

- a) Selon un calendrier établi, le stagiaire est affecté à différentes fonctions et responsabilités, souvent sous l'autorité de différents superviseurs ou formateurs, afin d'acquérir une expérience pratique la plus complète possible ;
- b) Les stagiaires peuvent être détachés durant une période déterminée auprès d'autres services, de fabricants ou d'autres Services météorologiques afin d'acquérir une expérience pratique que ne peut leur fournir leur propre service ou Service météorologique ;
- c) Les détachements internationaux s'adressent à des stagiaires d'un très bon niveau et sont en général financés par des accords bilatéraux ou des bourses.

• *Formation multimédia :*

- a) Les moyens utilisés sont les transparents, les vidéocassettes, les DVD et les CD-ROM ;
- b) Ces supports d'information nécessitent l'accès à un matériel onéreux compatible avec ceux-ci ;
- c) Ils peuvent servir à une formation collective ou individualisée ;
- d) Les programmes doivent comprendre des exercices, des questions et des sujets de discussion ;
- e) Dans le domaine des instruments météorologiques, ce type de formation est rarement utilisé faute de documents.

• *Enseignement individualisé :*

- a) Le formateur travaille aux côtés d'un stagiaire qui doit acquérir une compétence particulière ;
- b) Cette méthode peut s'appliquer à une formation de rattrapage ou à une formation supérieure.

• *Formation en cours d'emploi :*

- a) Il s'agit d'une composante essentielle du processus de formation. Il s'agit de la période au cours de laquelle le stagiaire apprend à mettre en pratique les connaissances qu'on lui a enseignées pour devenir spécialiste des instruments, accomplir des tâches très variées et résoudre de multiples problèmes. La meilleure façon d'acquérir des compétences consiste à les exercer ;
- b) La formation en cours d'emploi, qui nécessite certaines explications et mises en garde préalables, est bien adaptée notamment à l'enseignement de toutes les pratiques nécessitant de grandes aptitudes manuelles ou lorsqu'il est trop difficile ou onéreux de reproduire le matériel ou les conditions nécessaires dans un laboratoire ou un atelier. Citons en exemple l'installation de certains appareils, certaines opérations d'entretien et des étalonnages complexes ;
- c) Cette méthode tire parti des ressources humaines et matérielles disponibles et n'exige ni déplacements, ni personnel ou aménagements particuliers; elle répond aux besoins locaux. Elle est particulièrement bien adaptée quand l'enseignement pratique l'emporte nettement sur l'enseignement théorique, notamment pour la formation de techniciens ;
- d) Les dangers y afférents sont les suivants : elle peut devenir une méthode de formation normale, employée par défaut, alors qu'une formation plus structurée avec une solide composante théorique est requise pour produire des spécialistes aux connaissances plus complètes ; le choix des superviseurs peut ne pas tenir compte de leurs capacités ; la formation risque d'être trop restreinte et présenter des lacunes importantes ; il est possible aussi que l'efficacité de la formation ne soit pas mesurée avec objectivité ;
- e) Voici les conditions de réussite d'une formation en cours d'emploi :
 - Un plan de formation qui définit les compétences à acquérir ;
 - Un travail dont le contenu couvre les matières indispensables ;
 - Un superviseur qualifié dans ces matières, qui soit bon formateur, possède une bonne technique de l'enseignement, soit patient et sache donner des encouragements ;
 - Un stagiaire qui possède les connaissances théoriques voulues pour suivre la formation pratique ;
 - Un journal dans lequel le stagiaire note les connaissances et les compétences acquises ;
 - Une évaluation des progrès réalisée à intervalles réguliers par le superviseur chargé de la formation ;

- Une évaluation objective des compétences effectivement acquises (par l'observation ou des tests).

• *Pédagogie active :*

- a) Les stagiaires, qui sont les artisans du processus d'apprentissage, partagent leurs connaissances et leurs expériences pratiques ;
- b) Les stagiaires forment des groupes d'étude ou des équipes dans lesquels ils élisent leurs propres chefs ;
- c) Cette méthode est employée pour produire des idées, résoudre des problèmes, établir des plans, élaborer des projets et former des cadres.

• *Formation par les pairs :*

- a) Cette méthode nécessite des études et une préparation communes préalables ;
- b) Les stagiaires, réunis en petits groupes, assument à tour de rôle les fonctions de formateur, enseignent aux autres et répondent à leurs questions.

• *Enseignement programmé :*

- a) Celui-ci est bien adapté lorsqu'aucun formateur ou établissement de formation ne se trouve à proximité ;
- b) Les stagiaires travaillent seuls et à leur propre rythme selon un programme structuré dont les cours sont imprimés, multimédia ou informatisés ;
- c) Chaque étape de la formation comprend une épreuve d'autocorrection et de révision à subir avant de passer au sujet suivant ;
- d) Le matériel didactique est cher à produire et les cours n'offrent qu'un nombre restreint d'options.

Il est préférable d'avoir un bon professeur que de disposer d'un matériel didactique onéreux.

5.4.6 Télé-enseignement

Certains établissements de formation spécialisés dans les cours extra-muros diffusent des cours à des stagiaires distants soit sur une chaîne de télévision spéciale soit à certaines heures sur des chaînes commerciales.

5.4.7 Programmes vidéo

- a) La vidéo est un moyen intéressant puisqu'elle permet d'enregistrer des modes opératoires et de les visionner ensuite autant de fois que nécessaire, lorsqu'il est difficile de disposer d'un système d'instruments et d'un formateur qualifié ;

- b) Un cours utilisant cette méthode peut prévoir des coupures consacrées aux questions ;
- c) Il est préférable d'accompagner la vidéo de textes écrits et de discussions de groupe ;
- d) Les vidéos professionnelles sont chères et il y en a peu qui traitent des instruments météorologiques ; cependant, des amateurs peuvent réaliser des vidéos techniques à usage local à l'aide d'un matériel peu onéreux, en particulier si la réalisation est bien planifiée et que les commentaires techniques sont enregistrés sur la piste son dans un deuxième temps.

5.5 RESSOURCES DESTINÉES À LA FORMATION

Outre les moyens suggérés dans la section ci-dessus, les formateurs et les cadres ne doivent pas négliger les sources d'informations et de référence à leur disposition, les possibilités de formation à l'extérieur de leurs services, les compléments de formation que proposent d'autres organismes de formation et en particulier les ressources financières allouées aux activités de formation.

5.5.1 Organismes de formation

5.5.1.1 Organismes nationaux d'enseignement et de formation professionnelle

En général, les SMHN n'ont pas la possibilité de dispenser un enseignement et une formation professionnelle technique complets à leurs spécialistes des instruments. Pour ce qui est de la formation de base, de la formation complémentaire et du recyclage dans les techniques de pointe, ils dépendent donc, à des degrés différents, d'organismes de formation extérieurs. Les responsables de la technogénie météorologique doivent être au courant des programmes d'études que proposent les organismes nationaux pour être en mesure de conseiller leur personnel quant aux cours qu'il convient de suivre. L'OMM (2002a et 2002b) produit des directives sur les programmes d'études exigés pour les postes de spécialistes des instruments des différentes classes.

Lorsque les SMHN recrutent à l'extérieur des spécialistes des instruments ayant des compétences techniques poussées, il est souhaitable que ceux-ci aient suivi le programme d'études d'un organisme national de formation reconnu. Ils doivent ensuite compléter leur formation en météorologie et dans les techniques et les instruments de mesure météorologiques.

5.5.1.2 Rôle des centres régionaux d'instruments de l'OMM en matière de formation

Sur recommandation de la CIMO², plusieurs associations régionales de l'OMM ont créé des centres régionaux d'instruments chargés d'entretenir les étalons et de prodiguer des conseils. Leurs coordonnées et leur mandat figurent à l'Annexe 1.A du chapitre 1 de la Partie I.

Les centres régionaux d'instruments concentrent des compétences concernant les divers types d'instruments, leurs caractéristiques, leurs performances, leurs applications et leur étalonnage. Ils sont dotés d'une bibliothèque scientifique et technique sur les instruments, d'un laboratoire et d'un matériel de démonstration. Ils sont chargés de conserver un ensemble d'instruments étalons qu'il est possible de raccorder aux étalons internationaux par étalonnages successifs. Ils doivent pouvoir offrir des informations, des conseils et une aide aux Membres de leur Région.

Lorsque cela est possible, ces centres sont combinés avec un centre radiométrique régional et peuvent se situer dans un centre régional de formation professionnelle ou à proximité de celui-ci afin que les compétences et les ressources soient partagées.

Les centres régionaux d'instruments sont censés en particulier participer à l'organisation de cycles d'études ou de stages de formation régionaux portant sur l'entretien, la comparaison et l'étalement d'instruments météorologiques, et, à ces fins, fournir des installations et obtenir l'aide d'experts-conseils.

Les centres régionaux d'instruments devraient favoriser l'emploi des meilleures méthodes pédagogiques et donner accès à des ressources et à des moyens de formation hors de portée des SMHN. Ces centres doivent prévoir le recyclage de leurs propres experts dans des techniques de pointe, mais aussi dans des méthodes modernes de formation, afin de maintenir un niveau élevé de compétence.

Il conviendrait d'encourager les fabricants de systèmes d'instruments météorologiques à financer des séances de formation dans ces centres.

² Recommandation 19 de la Commission des instruments et des méthodes d'observation à sa neuvième session (1985).

5.5.1.3 Rôle des centres régionaux OMM/COI d'instruments maritimes en matière de formation

Sur recommandation de la CMOM³, un réseau de centres régionaux d'instruments maritimes a été établi pour entretenir les étalons et prodiguer des conseils sur la météorologie maritime et d'autres mesures océanographiques connexes. On en trouvera le mandat et les coordonnées à l'Annexe 4.A du chapitre 4 de la Partie II.

Ces centres sont des centres d'expertise des types, des caractéristiques, des performances, des applications et de l'étalonnage d'instruments. Ils disposent d'une bibliothèque technique consacrée à la science et à la pratique des instruments, de laboratoires et d'un matériel de démonstration. Ils entretiennent un ensemble d'étalons dont l'étalonnage est traçable par rapport à des normes internationales. Ils doivent pouvoir offrir des informations, des conseils et une aide aux Membres de leur Région.

Ces centres contribuent à l'organisation de stages régionaux de formation sur l'entretien, la comparaison et l'étalonnage d'instruments météorologiques maritimes et océanographiques et offrent des installations et des experts-conseils.

Ces centres doivent donner leur caution aux meilleures méthodes d'enseignement et proposer des ressources et des moyens de formation. Afin de maintenir leur capacité, ils organisent une remise à niveau de leurs propres experts en matière de méthodes de formation et de connaissances de pointe.

On pourrait inciter les fabricants d'instruments météorologiques maritimes et océanographiques à paraître des séances de formation organisées dans ces centres.

5.5.2 Ressources de l'OMM en matière de formation

5.5.2.1 Programmes d'études établis par l'OMM

On trouvera dans OMM (2002a et 2002b) le détail de programmes d'études pour les spécialisations en instruments météorologiques et en télécommunications météorologiques. Il convient de s'en inspirer en fonction des besoins et des normes de formation technique fixées à l'échelon national.

³ Recommandation 1 de la Commission technique mixte OMM/COI d'océanographie et de météorologie maritime à sa troisième session (2009).

5.5.2.2 Études de l'OMM sur les besoins en matière de formation

L'OMM mène périodiquement des études sur les besoins en matière de formation par région, classe de personnel et spécialisation dans les différents domaines d'application de la météorologie. Les résultats obtenus lui permettent de sélectionner les activités de formation qu'elle finance durant une période de quatre ans. Il importe que les pays Membres présentent à l'OMM une évaluation complète de leurs besoins en spécialistes des instruments pour que l'Organisation soit en mesure de tenir compte des véritables besoins dans ses activités de formation.

5.5.2.3 Publications de l'OMM dans le domaine de l'enseignement et de la formation professionnelle

Les spécialistes des instruments et leurs supérieurs trouveront des éléments d'information intéressants dans ces publications. L'OMM (1986) a publié deux volumes qui constituent un recueil de notes de cours sur les instruments météorologiques pour la formation du personnel météorologique de niveau technicien, dont on peut s'inspirer en classe ou dans une formation personnalisée.

5.5.2.4 Bibliothèque didactique de l'OMM

Cette bibliothèque publie un catalogue (OMM (1983)) de publications didactiques, d'aides audiovisuelles et de disques informatiques qu'il est possible d'acheter ou d'emprunter auprès de l'OMM.

5.5.2.5 Publications de l'OMM concernant les instruments et les méthodes d'observation

Parmi ces publications, on trouve des rapports de groupes de travail et de rapporteurs de la CIMO, des rapports de comparaisons d'instruments, etc., qui constituent des références techniques utiles tant pour la formation des spécialistes des instruments que dans leur travail.

5.5.2.6 Activités spéciales de formation financées par l'OMM

Les responsables des groupes techniques doivent se tenir au courant des possibilités de formation technique annoncées par l'OMM. Ils doivent pour cela entretenir des rapports avec leur service de formation et avec la personne qui reçoit le courrier y afférent dans leur organisation. Les possibilités de formation sont les suivantes :

- a) Experts, séminaires ou ateliers itinérants : lors qu'il y a lieu, la CIMO demande à un expert d'organiser un cours de formation, un cycle d'études ou un stage de formation spécial dans plusieurs pays Membres, en général au

sein d'une même région. Il peut se faire aussi que l'expert dispense cette formation dans un centre régional d'instruments ou dans un centre régional de formation professionnelle et que les stagiaires de la région se déplacent jusqu'à ce centre. On tente ainsi de proposer les meilleures compétences possibles au coût global le plus bas en s'adaptant à la situation locale particulière des stagiaires ;

- b) Bourses d'études : l'OMM octroie des bourses d'études dans le cadre de son Programme de coopération technique. Les fonds proviennent de plusieurs sources, y compris le Programme des Nations Unies pour le développement, le Programme de coopération volontaire, les fonds d'affectation spéciale de l'OMM, le budget ordinaire de l'Organisation et d'autres programmes d'aide bilatérale. Les bourses, qui peuvent être de courte (moins de douze mois) ou de longue (plusieurs années) durée, sont octroyées pour des études ou une formation dans des universités, des organismes de formation ou plus spécialement dans des centres régionaux de formation professionnelle relevant de l'OMM, à différents niveaux : cours sanctionnés par un diplôme universitaire, études post-universitaires, études de niveau supérieur non sanctionnées par un diplôme, cours de formation spécialisée, formation en cours d'emploi et formation technique au fonctionnement et à l'entretien du matériel. Toute demande de bourse doit d'abord être approuvée par le représentant permanent auprès de l'OMM du pays du candidat, celui-ci ne pouvant en effet la présenter directement à l'OMM. Elle doit comporter une description précise de la formation requise et une liste de priorités. Savant qu'il faut compter en moyenne huit mois pour établir le programme de formation d'un candidat, compte tenu de la complexité des consultations nécessaires entre le Secrétariat de l'OMM et les pays donateurs et bénéficiaires, il convient de déposer les demandes longtemps avant la période de formation proposée. Ce qui précède n'est qu'un résumé des conditions d'octroi de bourses d'études. Il faut s'adresser au Secrétariat de l'OMM pour obtenir tous les renseignements voulus à ce sujet et des formulaires de candidature. Les conditions d'admission étant très strictes, le dossier de demande doit être complet.

5.5.3 Autres possibilités de formation

5.5.3.1 Formation technique à l'étranger

Outre les bourses d'études de l'OMM, des organismes de certains pays proposent d'excellents programmes

de formation pouvant répondre aux besoins de certains candidats. Les spécialistes des instruments doivent se renseigner sur ces possibilités de formation auprès des représentants du pays ou de l'organisme dans leur propre pays.

5.5.3.2 Formation proposée par des fabricants d'instruments

Mentionnons les cas suivants :

- a) Achat de nouveaux systèmes d'acquisition de données : tous les contrats de vente de grands systèmes d'acquisition de données (y compris pour l'exécution de programmes financés par des donateurs) devraient accorder une place suffisante à la formation du personnel local à l'exploitation et à l'entretien des systèmes. Les représentants du Service météorologique national bénéficiaire doivent être en mesure de bien évaluer la formation offerte afin d'en négocier les conditions. La formation sur un nouveau système est dispensée habituellement au moment de la mise en service, mais il est bon aussi de prévoir une séance complémentaire après six mois d'exploitation ou lorsqu'un problème d'entretien important apparaît.
- b) Essai d'acceptation en usine, installation et mise en service : les travaux relatifs à la mise en place d'un système important d'acquisition de données, tel qu'un système de réception de signaux de satellites ou un radar, donnent aux stagiaires une occasion unique de se former et d'apprendre notamment les critères techniques très rigoureux à appliquer. L'essai d'acceptation est le processus qui consiste à faire subir au système une batterie de tests convenus au préalable pour vérifier que le cahier des charges est bien respecté, avant acceptation du système par l'acquéreur puis expédition.

Au cours de l'installation, il arrive souvent que les ingénieurs du fournisseur soient amenés à travailler en collaboration avec les ingénieurs de l'acquéreur. Il peut falloir intégrer aussi dans cette opération d'autres éléments, comme le bâtiment, l'alimentation électrique, les télécommunications et le traitement de données.

La mise en service consiste à effectuer des tests convenus au préalable une fois l'installation achevée afin de s'assurer une fois encore que le système correspond bien au cahier des charges.

Un pays peut saisir l'occasion fournie par l'installation et la mise en service d'un système d'instruments important pour inviter des stagiaires d'un autre pays, dans le cadre d'une entente bilatérale, à venir assister à ces opérations.

5.5.3.3 Programmes scientifiques internationaux

Les expériences à grande échelle organisées lors de l'exécution de programmes tels que le Programme climatologique mondial, le Programme consacré à la recherche atmosphérique et à l'environnement, le Programme concernant les cyclones tropicaux ou le Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe peuvent donner à des spécialistes locaux des instruments l'occasion de participer à des campagnes de mesure auprès de collègues plus chevronnés et d'en tirer des enseignements utiles.

5.5.3.4 Comparaisons internationales d'instruments parrainées par la Commission des instruments et des méthodes d'observation

Lorsqu'il y a lieu, la CIMO désigne une catégorie de mesures météorologiques qu'il convient d'étudier en particulier afin de faire avancer les connaissances. Il est alors organisé une comparaison d'instruments de marques différentes fournis par des Membres, selon des conditions normalisées dans les installations d'un pays hôte. Un comité d'organisation se charge de planifier la comparaison et présente ensuite dans son rapport les caractéristiques et les performances des différents instruments.

Lorsqu'ils peuvent être associés à ce type d'opération, les spécialistes des instruments ont la possibilité de tirer des enseignements utiles de leur participation à certaines des activités dans les domaines suivants : conception expérimentale, exposition des instruments, techniques d'exploitation, échantillonnage de données, acquisition de données, traitement de données, analyse et interprétation des résultats. Si de telles comparaisons peuvent être organisées dans des centres régionaux d'instruments, il y a peut-être lieu d'envisager la possibilité de tenir parallèlement un cours de formation spécial.

5.5.4 Détermination du budget de la formation

Le service de technogénie météorologique ou des instruments de tous les SMHN doit prévoir dans son budget annuel des fonds suffisants et clairement définis pour la formation du personnel, conformément au plan de gestion du personnel du Service. Il y a lieu de noter que le fait d'omettre la formation comporte également un coût qui se chiffre en erreurs, en accidents, en pertes de temps, en gaspillages de matériel, en frustrations pour le personnel et en un roulement élevé du personnel, tous préjudiciables à la qualité des données et des produits météorologiques.

5.5.4.1 Rapport coût-efficacité

Les activités de formation entraînent des dépenses importantes, mais les ressources seront probablement toujours limitées. Il est donc indispensable de fixer les coûts de différentes options de formation et de les comparer, de contrôler toutes les activités de formation sous l'angle du rapport coût-efficacité et de prendre les bonnes décisions. Globalement, dans un SMHN, l'investissement dans la formation doit être perçu comme productif.

5.5.4.2 Coûts directs et indirects

Les coûts peuvent être répartis entre les coûts directs imputables à la tenue de certains cours de formation et les coûts indirects ou frais généraux engagés pour offrir des installations et des moyens de formation. Il est possible d'affecter à chaque activité de formation une certaine partie des coûts indirects et des coûts directs d'exploitation. Lorsque les installations servent à de nombreuses activités tout au long de l'année, les coûts indirects par activité sont faibles et l'exploitation de ces installations est alors rentable.

Il est possible d'inclure dans les coûts directs les frais de déplacement des stagiaires et des enseignants, les frais de logement, les frais de repas et les indemnités journalières, le prix des cours et des enseignants, les dépenses afférentes au personnel de l'OMM, le coût des notes fournies aux stagiaires et des consommables particuliers au cours ainsi que le coût des congés de formation des stagiaires.

Il est possible d'inclure dans les coûts indirects ou frais généraux les bâtiments du centre de formation (classes, ateliers et laboratoires), les coûts afférents au matériel et les dépenses courantes, les salaires des enseignants et du personnel administratif, les frais généraux d'administration de l'OMM, le coût de production du matériel didactique (cours nouvellement conçu, notes documentaires, matériel audiovisuel) et le coût des consommables généralement utilisés pour les besoins de la formation.

Voici comment se classent, par ordre croissant, les divers types de formations en fonction des coûts généraux (ce qui dépend de l'efficacité avec laquelle les ressources sont exploitées) :

- a) Formation en cours d'emploi ;
- b) Cours par correspondance ;
- c) Cours audiovisuels ;
- d) Experts ou séminaires itinérants, cours sur place ;
- e) Cours nationaux donnés dans des centres où les participants doivent se rendre ;

- f) Enseignement assisté par ordinateur (coût initial de production élevé) ;
- g) Cours régionaux regroupant des participants d'autres pays ;
- h) Bourses d'études de longue durée ;
- i) Cours régionaux donnés dans des centres de formation spécialisés.

ANNEXE

CENTRES RÉGIONAUX DE FORMATION

<i>Pays</i>	<i>Nom du centre</i>	<i>Région de l'OMM</i>
Algérie	Institut hydrologique de formation et de recherche (IHFR), Oran	I
Angola ^a	Centre régional de formation professionnelle, Mulemba	I
Égypte	Centre régional de formation professionnelle, Le Caire	I
Kénya ^b	Institut de formation et de recherche en météorologie, Nairobi, et Département de météorologie, Université de Nairobi, Nairobi	I
Madagascar	École supérieure polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Antananarivo	I
Niger	École africaine de la météorologie et de l'aviation civile (EAMAC), Niamey, et Centre régional de formation, de recherche et d'application en hydrométéorologie opérationnelle (AGRHYMET), Niamey	I
Nigéria ^b	Institut de formation et de recherche en météorologie, Lagos, et Département de météorologie, Université fédérale de technologie, Akure	I
Chine ^b	Institut de météorologie de Nanjing, Nanjing, et Centre de formation de l'Administration météorologique chinoise, Beijing	II
Inde ^b	Centre de formation aux télécommunications et à la radiométéorologie, New Delhi, et Direction de la formation, Pune	II
Iran (Rép. islamique d')	Centre de formation supérieure en météorologie, Téhéran	II
Irak	Centre régional de formation, Bagdad	II
Ouzbékistan	École technique d'hydrométéorologie, Tachkent	II
Argentine ^b	Département des sciences de l'atmosphère, Université de Buenos Aires, Buenos Aires, et Département de l'enseignement et de la formation professionnelle du Service météorologique national, Buenos Aires	III
Brésil	Département de météorologie, Université fédérale de Pará, Belém	III
Vénézuela	Département de météorologie et d'hydrologie, Université centrale du Venezuela, Caracas	III
Barbade ^b	Institut de météorologie et d'hydrologie des Caraïbes, Bridgetown, et Université des Antilles, Bridgetown	IV
Costa Rica	Section de physique de l'atmosphère, École de physique, Université du Costa Rica, San José	IV
Philippines ^b	Département de météorologie et d'océanographie, Université des Philippines, et Centre de formation de l'Administration des sciences atmosphériques, géophysiques et astronomiques (PAGASA), Quezon City	V

CENTRES RÉGIONAUX DE FORMATION

(suite)

<i>Pays</i>	<i>Nom du centre</i>	<i>Région de l'OMM</i>
Fédération de Russie ^b	Institut de formation supérieure et Collège d'hydrométéorologie de Moscou, Moscou, et Institut hydrométéorologique d'État de Russie, Saint-Pétersbourg	VI
Israël	Centre de formation postuniversitaire en météorologie appliquée, Bet Dagan	VI
Italie ^b	École météorologique internationale de la Méditerranée, Erice, Sicile, et Institut d'agrométéorologie et d'analyse environnementale appliquée à l'agriculture, Florence	VI
Turquie	École technique supérieure de météorologie d'Anatolie, Ankara	VI

a) Les travaux en vue de la réouverture du Centre régional de formation professionnelle de l'Angola sont en cours.

b) Ces centres comprennent une composante universitaire.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES

- Craig, R.L. (sous la direction de), 1987 : *Training and Development Handbook : A Guide to Human Resource Development*. McGraw-Hill, New York.
- Imai, M., 1986 : *Kaizen : The Key to Japan's Competitive Success*. Random House, New York.
- Moss, G., 1987 : *The Trainer's Handbook*. Ministère de l'agriculture et de la pêche, Nouvelle-Zélande.
- Organisation internationale de normalisation, 1994a : *Normes pour le management de la qualité et l'assurance de la qualité – Partie 1 : Lignes directrices pour leur sélection et utilisation*. ISO 9000-1 ; 1994, Genève.
- Organisation internationale de normalisation, 1994b : *Management de la qualité et éléments de système qualité – Partie 1 : Lignes directrices*. ISO 9004-1 ; 1994, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1983 : *Catalogue of Meteorological Training Publications and Audiovisual Aids*. Troisième édition, Rapport N° 4 sur l'enseignement et la formation professionnelle, WMO/TD-No. 124, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1986 : *Recueil de notes de cours sur les instruments météoro-*
logiques pour la formation du personnel météorologique des classes III et IV (D.A. Simidchiev). OMM-N° 622, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1989 : *Guide du Système mondial d'observation*. OMM-N° 488, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1990 : *Guidance for the Education and Training of Instrument Specialists* (R.A. Pannett). Rapport N° 8 sur l'enseignement et la formation professionnelle, WMO/TD-No. 413, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2002a : *Directives pour la formation professionnelle des personnels de la météorologie et de l'hydrologie opérationnelle*. Volume I : Météorologie. Quatrième édition, OMM-N° 258, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 2002b : *Initial Formation and Specialisation of Meteorological Personnel : Detailed Syllabus Examples*. WMO/TD-No. 1101, Genève.
- Walton, M., 1986 : *The Deming Management Method*. Putnam Publishing, New York.

APPENDICE

LISTE DES CONTRIBUTEURS AU GUIDE

Artz, R. (États-Unis d'Amérique)	Luke, R. (États-Unis d'Amérique)
Ball, G. (Australie)	Nash, J. (Royaume-Uni)
Behrens, K. (Allemagne)	Oke, T. (Canada)
Bonnin, G.M. (États-Unis d'Amérique)	Painting, D.J. (Royaume-Uni)
Bower, C.A. (États-Unis d'Amérique)	Pannett, R.A. (Nouvelle-Zélande)
Canterford, R. (Australie)	Qiu Qixian (Chine)
Childs, B. (États-Unis d'Amérique)	Rudel, E. (Autriche)
Claude, H. (Allemagne)	Saffle, R. (États-Unis d'Amérique)
Crum, T. (États-Unis d'Amérique)	Schmidlin, F.J. (États-Unis d'Amérique)
Dombrowsky, R. (États-Unis d'Amérique)	Sevruk, B. (Suisse)
Edwards, M. (Afrique du Sud)	Srivastava, S.K. (Inde)
Evans, R.D. (États-Unis d'Amérique)	Steinbrecht, W. (Allemagne)
Feister, E. (Allemagne)	Stickland, J. (Australie)
Forgan, B.W. (Australie)	Stringer, R. (Australie)
Hilger, D. (États-Unis d'Amérique)	Sturgeon, M.C. (États-Unis d'Amérique)
Holleman, I. (Pays-Bas)	Thomas, R.D. (États-Unis d'Amérique)
Hoogendijk, K. (Pays-Bas)	Van der Meulen, J.P. (Pays-Bas)
Johnson, M. (États-Unis d'Amérique)	Vanicek, K. (République tchèque)
Klapheck, K.-H. (Allemagne)	Wieringa, J. (Pays-Bas)
Klausen, J. (Suisse)	Winkler, P. (Allemagne)
Koehler, U. (Allemagne)	Zahumensky, I. (Slovaquie)
Ledent, T. (Belgique)	Zhou Weixin (Chine)

P-OBS_111350