

Guide des pratiques climatologiques

Édition 2018

TEMPS CLIMAT EAU



ORGANISATION
MÉTÉOROLOGIQUE
MONDIALE

OMM-N° 100

Guide des pratiques climatologiques

Édition 2018



ORGANISATION
MÉTÉOROLOGIQUE
MONDIALE

OMM-N° 100

NOTE DE L'ÉDITEUR

La base de données terminologique de l'OMM, METEOTERM, peut être consultée à l'adresse <http://public.wmo.int/fr/ressources/meteoterm>.

Il convient d'informer le lecteur que lorsqu'il copie un lien en le sélectionnant dans le texte, des espaces peuvent apparaître après <http://>, <https://>, <ftp://>, <mailto:>, et après les barres obliques (/), les tirets (-), les points (.) et les séquences de caractères (lettres et chiffres). Il faut supprimer ces espaces de l'URL ainsi recopiée. L'URL correcte apparaît lorsque l'on place le curseur sur le lien. On peut aussi cliquer sur le lien et copier l'adresse qui s'affiche dans le ruban du navigateur.

OMM-N° 100

© Organisation météorologique mondiale, 2018

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 81 17
Courriel: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-20100-3

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.

TABLEAU DES MISES À JOUR

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
TABLEAU DES MISES À JOUR	iii
PRÉFACE	ix
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
1.1 Objet et contenu du Guide.....	1
1.2 Climatologie.....	1
1.2.1 Historique	2
1.2.2 Le système climatique	3
1.2.3 Utilisations de l'information et de la recherche en climatologie	7
1.3 Programmes internationaux relatifs au climat	8
1.4 Activités mondiales et régionales relatives au climat	8
1.5 Activités nationales relatives au climat	10
1.6 Gestion de la qualité	12
BIBLIOGRAPHIE	15
CHAPITRE 2. OBSERVATIONS, STATIONS ET RÉSEAUX CLIMATOLOGIQUES	17
2.1 Introduction	17
2.2 Éléments climatiques	18
2.2.1 Éléments en surface et sous la surface.....	19
2.2.2 Éléments en altitude	23
2.2.3 Éléments mesurés par télédétection	24
2.3 Instruments	24
2.3.1 Équipement de base en surface	26
2.3.2 Instruments de mesure en altitude	27
2.3.3 Télédétection à partir de la surface	28
2.3.4 Télédétection à partir d'aéronefs et de l'espace	28
2.3.5 Étalonnage des instruments	31
2.4 Emplacement des stations climatologiques	32
2.5 Conception des réseaux climatologiques	34
2.6 Fonctionnement des stations et des réseaux	36
2.6.1 Heures des observations	36
2.6.2 Enregistrement et transmission des observations	37
2.6.3 Contrôle de la qualité sur site	37
2.6.4 Fonctions générales des observateurs	38
2.6.5 Formation professionnelle des observateurs	38
2.6.6 Inspection des stations	39
2.6.7 Préservation de l'homogénéité des données	40
2.6.8 Contrôle des messages aux centres de collecte	40
2.6.9 Documentation relative à la station et métadonnées	41
BIBLIOGRAPHIE	43
CHAPITRE 3. GESTION DES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES	46
3.1 Introduction	46
3.2 Importance et objet de la gestion des données	47
3.2.1 Conception des systèmes de gestion des données climatologiques	48
3.2.2 Acquisition des données d'un CDMS	51
3.2.3 Documentation sur les données d'un CDMS	52
3.2.4 Stockage des données d'un CDMS	53
3.2.5 Accès aux données et extraction des données d'un CDMS	54

	Page
3.2.6 Archives d'un CDMS	54
3.2.7 Sécurité d'un CDMS	54
3.2.8 Gestion d'un CDMS	55
3.2.9 Normes et directives internationales relatives aux CDMS	55
3.3 Contrôle de la qualité	57
3.3.1 Procédures de contrôle de la qualité	58
3.3.2 Documentation sur le contrôle de la qualité	59
3.3.3 Types d'erreur	59
3.3.4 Tests des formes de présentation	60
3.3.5 Tests de complétude	60
3.3.6 Tests de cohérence	60
3.3.7 Tests de dispersion	62
3.4 Échange de données climatologiques	62
3.5 Sauvetage des données	65
 BIBLIOGRAPHIE	 67
 CHAPITRE 4. CARACTÉRISATION DU CLIMAT À L'AIDE DE JEUX DE DONNÉES	 68
4.1 Introduction	68
4.2 Évaluation des jeux de données	68
4.3 Visualisation qualitative des données	69
4.4 Descripteurs quantitatifs synthétiques des données	70
4.4.1 Modèles de données mis en évidence par la distribution de fréquence	71
4.4.2 Paramètres de tendance centrale	77
4.4.3 Paramètres de dispersion	80
4.4.4 Paramètre de symétrie	81
4.4.5 Paramètre d'aplatissement	81
4.4.6 Indices	82
4.5 Corrélation	82
4.5.1 Tableaux de contingence	82
4.5.2 Coefficients de corrélation	83
4.6 Séries chronologiques	83
4.7 Interprétation des caractéristiques synthétiques du climat	85
4.8 Normales	86
4.8.1 Période utilisée pour les calculs	87
4.8.2 Stations pour lesquelles les normales et les moyennes sont calculées	88
4.8.3 Homogénéité des données	88
4.8.4 Données manquantes	88
4.8.5 Température moyenne quotidienne	89
4.8.6 Quintiles des précipitations	90
 BIBLIOGRAPHIE	 91
 CHAPITRE 5. MÉTHODES STATISTIQUES D'ANALYSE DE JEUX DE DONNÉES	 92
5.1 Introduction	92
5.2 Homogénéisation	93
5.2.1 Évaluation de données homogénisées	97
5.3 Ajustement de modèles pour évaluer les distributions de données	98
5.4 Transformation de données	99
5.5 Analyse de séries chronologiques	100
5.6 Analyse multidimensionnelle	101
5.7 Analyse comparative	102
5.8 Lissage	103
5.9 Estimation de données	105
5.9.1 Méthodes mathématiques d'estimation	105

	Page
5.9.2 Estimation fondée sur des relations physiques	106
5.9.3 Méthodes d'estimation spatiale	107
5.9.4 Estimation de séries chronologiques	108
5.9.5 Validation	108
5.10 Analyse des valeurs extrêmes	109
5.10.1 Méthode de la période de retour	109
5.10.2 Précipitation maximale probable	110
5.11 Méthodes robustes en statistique	111
5.12 Logiciels de statistique	111
5.13 Fouille de données	112
 BIBLIOGRAPHIE	 113
 CHAPITRE 6. PRODUITS CLIMATOLOGIQUES ET DIFFUSION DE CES PRODUITS	 116
6.1 Directives générales	116
6.1.1 Périodiques de données climatologiques	117
6.1.2 Publications occasionnelles	118
6.1.3 Produits types	118
6.1.4 Produits spécialisés	119
6.1.5 Produits de la surveillance du climat	119
6.1.6 Indices	120
6.2 Données aux points de grille	121
6.2.1 Jeux de données aux points de grille fondés sur des observations	121
6.2.2 Jeux de données aux points de grille fondés sur des modèles climatiques	125
6.2.3 Données de simulation rétrospective	126
6.2.4 Produits de réanalyse	127
6.3 Modèles climatiques et perspectives d'évolution du climat	129
6.3.1 Produits concernant l'évolution probable du climat	129
6.3.2 Prévisions et projections climatiques	131
6.3.3 Scénarios climatiques	132
6.3.4 Modèles climatiques mondiaux	133
6.3.5 Réduction d'échelle: modèles climatiques régionaux	134
6.4 Exemples de produits et de représentations graphiques des données	135
 BIBLIOGRAPHIE	 142
 CHAPITRE 7. PRESTATION DE SERVICES	 144
7.1 Introduction	144
7.2 Utilisateurs et utilisations de l'information climatologique	145
7.3 Interaction avec les utilisateurs	147
7.4 Information et diffusion des produits et des services	150
7.5 Commercialisation des services et des produits	152
 BIBLIOGRAPHIE	 154
 ANNEXE. ACTIVITÉS INTERNATIONALES RELATIVES AU CLIMAT	 155
 BIBLIOGRAPHIE	 161

PRÉFACE

Conformément à sa Convention, un des buts de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) consiste à encourager la normalisation des observations météorologiques et connexes, notamment celles qui s'appliquent aux études et aux pratiques climatologiques. C'est pourquoi le Congrès météorologique mondial a adopté, et modifié lorsqu'il y a lieu, le Règlement technique dans lequel sont établies les pratiques et les procédures météorologiques que les Membres de l'Organisation s'engagent à suivre. Ce Règlement technique est complété par des guides qui indiquent de façon plus détaillée les pratiques, les procédures et les spécifications que les Membres sont invités à suivre ou à appliquer lorsqu'ils prennent leurs dispositions pour se conformer au Règlement technique, de même que lorsqu'ils aménagent leurs services météorologiques et climatologiques respectifs. Dans cette série de guides figure le *Guide des pratiques climatologiques* (OMM-N° 100), dont l'objectif est de fournir sous une forme utile, à tous ceux qui s'occupent de climatologie, des renseignements indispensables pour mener à bien leurs travaux. Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de donner une description complète des bases théoriques ou d'énoncer l'éventail complet des applications des méthodes et techniques climatologiques; certains ouvrages de référence sont signalés à cet effet, lorsqu'il y a lieu.

La première édition du *Guide des pratiques climatologiques* remonte à 1960; elle consistait en des textes élaborés par la Commission de climatologie et préparés, avec l'aide du Secrétariat de l'OMM, par un groupe de travail spécial. La deuxième édition du Guide a pour origine la sixième session de la Commission des applications spéciales de la météorologie et de la climatologie (1973), qui a chargé le groupe de travail de préparer un ouvrage révisé en profondeur, compte tenu de l'évolution de la climatologie au cours de la décennie écoulée ainsi que des progrès accomplis dans l'utilisation de l'information sur le climat et des connaissances acquises dans différents domaines de la météorologie et d'autres disciplines. Lors de sa septième session (1978), la Commission a reconduit le groupe de travail pour qu'il achève la deuxième édition, un chapitre après l'autre, et produise la version qui sera finalement publiée en 1983. Depuis lors, les activités liées au climat ont pris beaucoup d'ampleur dans presque tous les domaines et tout particulièrement dans le domaine scientifique et dans celui de l'action publique. Le *Guide des pratiques climatologiques* est un ouvrage de référence capital, destiné à aider les Membres à produire un flux continu d'informations indispensables au bon fonctionnement quotidien des Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN).

Les travaux portant sur la troisième édition du Guide ont débuté en 1990, après que le Groupe de travail consultatif de la Commission de climatologie eut approuvé, au cours d'une réunion tenue à Norrköping (Suède), le choix de son contenu et de celles et ceux qui seraient chargés de la rédaction. Un comité de rédaction fut ensuite constitué pour superviser les auteurs principaux et les responsables des différents chapitres. Il fallut cependant attendre 1999 pour que les auteurs principaux reçoivent un projet de résumé à partir duquel ils purent élaborer le texte plus avant. Au cours de l'année qui suivit, le comité de rédaction se réunit à Reading (Royaume-Uni), pour fixer le contenu et régler des détails de chaque chapitre. En 2001, à sa treizième session, la Commission de climatologie décida de créer une Équipe d'experts pour le Guide des pratiques climatologiques, avec un mandat clairement défini pour accélérer le processus. Alors que la première partie de la publication était accessible sur le Web, il restait encore à déployer un effort substantiel pour terminer la deuxième partie et assurer la présentation de l'information sur les exigences spéciales concernant la fourniture de services climatologiques. À sa quatorzième session, en 2005, la Commission reconduisit l'Équipe d'experts et décida que certaines activités déterminantes relèveraient de son Groupe de gestion. Ces activités comprenaient la poursuite de l'élaboration de la deuxième partie du Guide et de plus amples travaux concernant l'examen et la désignation de centres climatologiques régionaux. L'Équipe d'experts, réunie à Toulouse (France) cette même année, décida de compiler un projet de texte complet, assorti d'annexes, pour la troisième édition du Guide.

Grâce aux efforts conjugués et aux compétences des nombreux auteurs, éditeurs et réviseurs internes et externes, le texte de la troisième édition du Guide a été finalement approuvé par le président de la Commission de climatologie juste avant la tenue de la quinzième session de la Commission à Antalya (Turquie), en février 2010. À sa seizième session, qui s'est tenue à Heidelberg (Allemagne) en juillet 2014, la Commission a décidé de créer une équipe

spéciale chargée du *Guide des pratiques climatologiques*, en lui donnant mandat de procéder à l'actualisation régulière de cette publication et de permettre ainsi aux utilisateurs de disposer en temps opportun des meilleures connaissances scientifiques en la matière. La présente version du Guide, qui a été approuvée par la Commission de climatologie à sa dix-septième session (Genève, avril 2018), est fondée sur les travaux de cette équipe spéciale.

La version actualisée du Guide est publiée en anglais et sera progressivement traduite dans les autres langues officielles de l'OMM, ce qui permettra une diffusion optimale des connaissances. Comme ce fut le cas pour les versions précédentes, les Membres de l'OMM pourront traduire le Guide dans leurs langues nationales, le cas échéant.

Je voudrais exprimer ici ma gratitude à la Commission de climatologie de l'OMM, qui a pris l'initiative de superviser ce long processus. Au nom de l'Organisation météorologique mondiale, je souhaite aussi remercier tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de cette publication. Je tiens à remercier tout spécialement M. Thomas C. Peterson, président sortant de la Commission de climatologie (2010–2018), qui a guidé et supervisé la préparation du texte tout au long des quinzième et seizième intersessions de la Commission. Je souhaite également souligner l'importance de la contribution de M. Govindarajalu Srinivasan (Inde), responsable de l'Équipe d'experts chargée du Guide, et de M. Nathaniel Guttman (États-Unis d'Amérique), réviseur scientifique principal de la présente version de la publication.



(Petteri Taalas)
Secrétaire général

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

1.1 OBJET ET CONTENU DU GUIDE

Les Membres de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) trouveront dans la présente publication les conseils et l'assistance nécessaires pour mettre en place des activités nationales dans le domaine de l'information et des services en climatologie. Deux éditions du Guide ont précédé la présente édition. La première est parue en 1960 et la deuxième, en 1983 en anglais et en 1990 en français. Bon nombre des notions fondamentales sur lesquelles reposent la science du climat et les pratiques climatologiques sont toujours les mêmes. Cependant, compte tenu de l'évolution des connaissances scientifiques en climatologie et des techniques d'analyse des données, ainsi que des avancées enregistrées dans les domaines de la technologie, des capacités de calcul et des instruments, la deuxième édition du Guide est désormais dépassée.

Cette troisième édition décrit les principes fondamentaux et les pratiques modernes qui sont essentiels pour la mise en place et le fonctionnement de tous les services climatologiques; elle indique aussi les méthodes jugées optimales en climatologie. On y présente des concepts et des réflexions et, au lieu de rechercher l'exhaustivité à tout prix, on fait référence à d'autres sources d'orientations et de renseignements techniques. La présente version, qui a été publiée en 2011, fera cependant l'objet d'un examen régulier aux fins d'actualisation de son contenu.

Le premier chapitre présente la climatologie et son objet, l'organisation et les fonctions d'un Service climatologique national et les programmes internationaux portant sur le climat. Le reste du Guide se divise en six chapitres (observations, stations et réseaux climatologiques; gestion des données climatologiques; caractérisation du climat à l'aide de jeux de données; méthodes statistiques d'analyse de jeux de données; produits climatologiques et diffusion de ces produits; prestation de services) et une annexe (activités internationales relatives au climat).

Les méthodes présentées dans le Guide découlent, dans la mesure du possible, de décisions prises en matière de normes et de pratiques et procédures recommandées. Les principales décisions ayant trait aux pratiques climatologiques figurent dans le Règlement technique et les manuels de l'OMM, ainsi que dans les rapports du Congrès météorologique mondial et du Conseil exécutif de l'OMM; elles sont issues principalement de recommandations formulées par la Commission de climatologie. Des listes de publications de l'OMM et d'autres ouvrages particulièrement utiles pour ceux qui œuvrent dans le domaine de la climatologie sont fournies dans la section «Bibliographie» figurant à la fin de chacun des chapitres.

1.2 CLIMATOLOGIE

La climatologie est l'étude du climat, du mode de fonctionnement du système climatique, de ses variations et de ses extrêmes, ainsi que de ses incidences sur diverses activités comprenant, sans s'y limiter, celles qui se rapportent aux ressources en eau, à la santé, à la sécurité et au bien-être. Au sens strict, le climat peut être défini comme les conditions météorologiques moyennes régnant en un lieu particulier au cours d'une certaine période de temps. Pour décrire le climat, on peut se servir de données statistiques sur les tendances centrales et la variabilité d'éléments tels que la température, les précipitations, la pression atmosphérique, l'humidité et le vent, ou alors d'un ensemble d'éléments tels que les types de temps ou les phénomènes caractéristiques d'un lieu ou d'une région, voire de l'ensemble de la planète, sur une période donnée. En plus d'être traité comme une entité statistique, le climat peut également être étudié comme un élément déterminant, une ressource et un danger pour les activités humaines.

La climatologie traite à la fois de la variabilité du climat et du changement climatique. La variabilité du climat se réfère aux variations des conditions climatiques d'une période de temps à une autre (intrasaisonnières, interannuelles, interdécennales, etc.). En général, elle est liée à des fluctuations de l'état de la circulation atmosphérique et océanique et des propriétés de la surface

des terres émergées (l'humidité des sols, par exemple) à des échelles de temps intrasaisonnières à interdécentnales. Le changement climatique, en revanche, se réfère à un changement systématique dans les propriétés statistiques du climat (par exemple la moyenne et la variance) sur une période prolongée (plusieurs décennies à plusieurs siècles, par exemple) se manifestant par une tendance à la hausse ou à la baisse, par exemple des valeurs relatives aux précipitations extrêmes. Pendant la plus grande partie de l'histoire climatique de la Terre, les changements systématiques en matière de climat ont résulté de causes naturelles telles que les variations de la trajectoire de l'orbite de la Terre autour du Soleil ou du rayonnement solaire et les modifications des relations entre les éléments «naturels» qui constituent le système climatique (voir 1.2.2). Cependant, de plus en plus d'indices donnent désormais à penser que les êtres humains et leurs activités constituent une composante importante du système climatique.

1.2.1 Historique

La poésie de la Grèce antique et l'Ancien Testament faisaient déjà référence aux conditions météorologiques. Il est possible de trouver des allusions au temps encore plus anciennes, dans les Veda, à savoir les plus vieux écrits hindous datant d'environ 1800 avant J.-C. Des textes portant spécifiquement sur la météorologie et la climatologie se trouvent dans le traité d'Hippocrate intitulé *Des airs, des eaux et des lieux*, qui date d'environ 400 avant J.-C., puis dans celui d'Aristote intitulé *Météorologiques*, datant d'environ 350 avant J.-C. Pour les philosophes de la Grèce antique, le mot climat signifiait «inclinaison», évoquant la variation du climat en fonction de la latitude en raison de la différence d'incidence des rayons solaires sur la surface du globe. Concernant le climat, on trouve aussi des déductions probantes, basées sur la logique, dans les travaux des philosophes de l'école d'Alexandrie que sont Ératosthène et Aristarque.

Avec le développement de l'exploration géographique au XV^e siècle, des descriptions des climats de la Terre et des conditions favorisant leur émergence ont vu le jour. L'invention d'instruments météorologiques, notamment le thermomètre mis au point par Galilée en 1593 et le baromètre par Torricelli en 1643, a donné un élan accru aux travaux qui vont permettre d'établir des relations mathématiques et physiques entre les différentes caractéristiques de l'atmosphère. Celles-ci vont ensuite permettre d'établir des relations susceptibles de décrire l'état du climat à différentes périodes et en différents lieux.

C'est George Hadley qui, le premier, en 1735, interprète le régime caractéristique de la circulation de l'atmosphère entre les zones tropicales et les zones subtropicales, y compris les phénomènes des alizés, de la convection tropicale et des déserts tropicaux. Cette composante de la circulation sera d'ailleurs qualifiée de cellule de Hadley. Julius von Hann est l'auteur du célèbre *Manuel de climatologie* dont le premier volume fut publié en 1883; il s'agit d'un ouvrage portant sur la climatologie générale et régionale, qui regroupait des données, mais aussi des descriptions relatées par des témoins oculaires de conditions atmosphériques et climatiques. En 1918, Wladimir Köppen établit la première classification détaillée des climats de la planète, fondée sur la couverture végétale des terres émergées. La climatologie descriptive connaît ensuite différents approfondissements. Le géographe E.E. Fedorov (1927) tente, par exemple, de décrire les climats locaux en se basant sur des observations quotidiennes des conditions atmosphériques. Au cours des trente premières années du XX^e siècle, des efforts diligents de description de l'atmosphère combinant observations mondiales et théorie mathématique ont conduit à l'identification de phénomènes atmosphériques de grande échelle. Distinguons à ce sujet l'œuvre de Sir Gilbert Walker, qui conduisit des études approfondies sur la mousson en Inde, l'oscillation australe, l'oscillation de l'Atlantique Nord et l'oscillation du Pacifique Nord.

Il y lieu de citer aussi, parmi les travaux d'envergure menés en climatologie, ceux réalisés par Tor Bergeron (sur la climatologie dynamique, publiés en 1930) et par Wladimir Köppen et Rudolf Geiger, qui ont publié un manuel de climatologie en 1936. Geiger a commencé à décrire en détail le concept de microclimatologie en 1927, mais il a fallu attendre la Seconde Guerre mondiale pour que des progrès soient réalisés à ce sujet. Pendant la guerre, il a été jugé nécessaire, à des fins de planification, d'élaborer et de mettre à l'épreuve le concept de risque probable appliqué aux données météorologiques plusieurs mois voire plusieurs années à l'avance.

C.W. Thornthwaite a dressé une classification du climat en 1948 en se fondant sur le bilan hydrique et l'évapotranspiration. Dans les décennies qui suivirent, les théories sur la climatologie firent de grands progrès.

En septembre 1929, la Conférence des directeurs relevant de l'Organisation météorologique internationale (OMI), réunie à Copenhague, convint d'établir une commission technique de climatologie «pour l'étude de toutes les questions relatives à cette discipline scientifique». Crée en 1950 pour succéder à l'OMI, en place depuis 1873, l'OMM mit sur pied un système de collecte de données et ouvrit la voie à une analyse systématique du climat qui allait conduire à des conclusions sur la nature du climat. Au cours des dernières décennies du XX^e siècle, l'étude des changements climatiques a attiré l'attention sur la nécessité d'appréhender le climat en tant que composante principale d'un système planétaire de processus en interaction touchant tous les éléments du système terrestre (voir 1.2.2). Un changement climatique est une altération statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant une période prolongée (généralement des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels, à des forçages externes ou à des changements anthropiques (résultant des activités humaines ou produits par les êtres humains) persistants, touchant la composition de l'atmosphère ou l'utilisation des sols. Des efforts considérables, déployés à l'échelle nationale et internationale, portent aussi sur d'autres aspects de la climatologie. Il s'agit notamment d'améliorer la mesure et la surveillance continue du climat, d'approfondir les connaissances sur les causes et sur les schémas de la variabilité naturelle, de mettre au point des méthodes plus fiables de prévision du climat à une échéance allant de la saison à plusieurs années et de renforcer la compréhension des liens existant entre le climat, d'une part, et les activités d'ordre social et économique et les changements écologiques, d'autre part.

Trois conférences mondiales sur le climat, organisées par l'OMM en collaboration avec d'autres organismes et programmes des Nations Unies en 1979, 1990 et 2009, ont profondément modelé et influencé les activités menées récemment dans ce domaine. On trouvera de plus amples renseignements sur ces trois conférences dans l'annexe consacrée aux activités internationales relatives au climat.

1.2.2 Le système climatique

Le système climatique (figure 1.1) est un système complexe et interactif comprenant l'atmosphère, la surface des terres émergées, les neiges et les glaces, les océans et autres masses d'eau et les organismes vivants. L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse de la Terre. L'atmosphère sèche est composée presque entièrement d'azote et d'oxygène, mais aussi d'argon, d'hélium, de dioxyde de carbone, d'ozone et de méthane en petites quantités et de plusieurs autres gaz à l'état de traces. L'atmosphère contient aussi de la vapeur d'eau, de l'eau condensée sous forme de gouttelettes constituant les nuages et des aérosols. Dans le système climatique terrestre, l'hydroosphère est la composante qui regroupe toutes les eaux de surface et les eaux souterraines à l'état liquide, telles que les océans, les mers, les fleuves, les lacs d'eau douce, les nappes souterraines, etc. On entend par cryosphère l'ensemble des constituants du système terrestre composés d'eau à l'état solide, qu'il s'agisse de neige ou de glace (glaces de mer, de lac et de cours d'eau, couverture neigeuse, précipitations solides, glaciers, calottes glaciaires, inlandsis et sols gelés de façon permanente ou saisonnière). La lithosphère superficielle est la couche supérieure de la Terre à l'état solide, à savoir la croûte tant continentale qu'océanique. La biosphère comprend tous les écosystèmes et organismes vivants se trouvant dans l'atmosphère, sur les terres émergées (biosphère terrestre) ou dans les océans (biosphère marine), y compris la matière organique morte dérivée telle que les déchets, la matière organique des sols et les détritus des océans.

Sous l'effet du rayonnement solaire et en fonction des propriétés radiatives de la surface de la Terre, les interactions des diverses composantes du système climatique déterminent le climat que connaît notre planète. Les interactions de l'atmosphère avec les autres composantes jouent un rôle prépondérant dans la formation du climat. L'énergie captée par l'atmosphère provient directement du rayonnement solaire incident ou indirectement de processus faisant intervenir la surface du globe. Le système dans son ensemble recherchant, sans pouvoir les

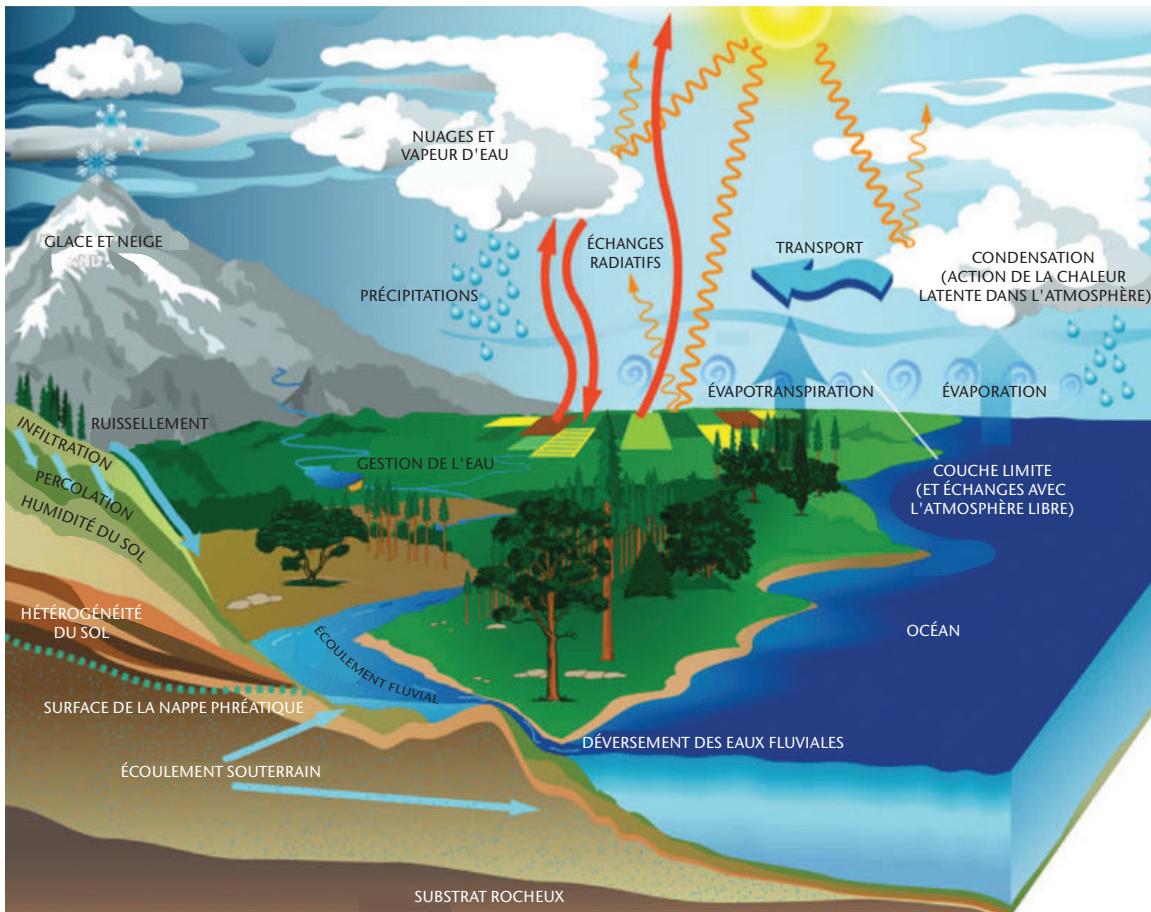


Figure 1.1 Le système climatique

atteindre, stabilité et équilibre, cette énergie est redistribuée en permanence sur le plan vertical et sur le plan horizontal par des processus thermodynamiques ou des mouvements de grande échelle. La vapeur d'eau joue un rôle important dans la redistribution verticale de la chaleur par condensation et transport de chaleur latente. Compte tenu de sa capacité thermique énorme, l'océan atténue la vitesse à laquelle les variations de température se produisent dans l'atmosphère et alimente celle-ci en vapeur d'eau et en chaleur. La répartition des continents influe sur les courants océaniques, tout comme les massifs montagneux le font sur les mouvements de l'atmosphère. La glace, qu'elle se situe aux pôles, en montagne ou en mer, réfléchit le rayonnement solaire vers l'espace. Aux latitudes élevées, la glace de mer agit comme un isolant, protégeant ainsi l'océan contre une perte rapide d'énergie en faveur de l'atmosphère bien plus froide. La biosphère, y compris les activités humaines, influe sur les éléments de l'atmosphère, notamment le dioxyde de carbone, ainsi que sur des caractéristiques de la surface du globe, comme l'humidité du sol et l'albédo.

Les interactions des diverses composantes se produisent à toutes les échelles spatiales (figures 1.2 et 1.3). À petite échelle, les caractéristiques climatiques portent sur des espaces restreints (bâtiments, végétaux ou champs particuliers, par exemple). Une variation microclimatique peut avoir des conséquences importantes quand les caractéristiques physiques d'un espace changent. À titre d'exemple, de nouveaux bâtiments peuvent accentuer les conditions de vent, réduire le renouvellement de l'air, rendre excessif le ruissellement des eaux de pluie ou encore augmenter la pollution et la chaleur. Les variations naturelles d'un microclimat, notamment celles ayant trait au fait qu'un endroit se trouve à l'abri ou exposé, au soleil ou à l'ombre, sont aussi importantes: elles peuvent déterminer, par exemple, quels végétaux prospéreront en un lieu donné ou s'il est nécessaire de prendre des mesures particulières pour vaquer à ses occupations en toute sécurité, qu'il s'agisse d'activités professionnelles ou de loisirs. L'échelle moyenne correspond au climat d'une région à l'étendue relativement faible, telle que le bassin versant d'un cours d'eau, une vallée, une agglomération ou une forêt. Les variations d'échelle moyenne tiennent

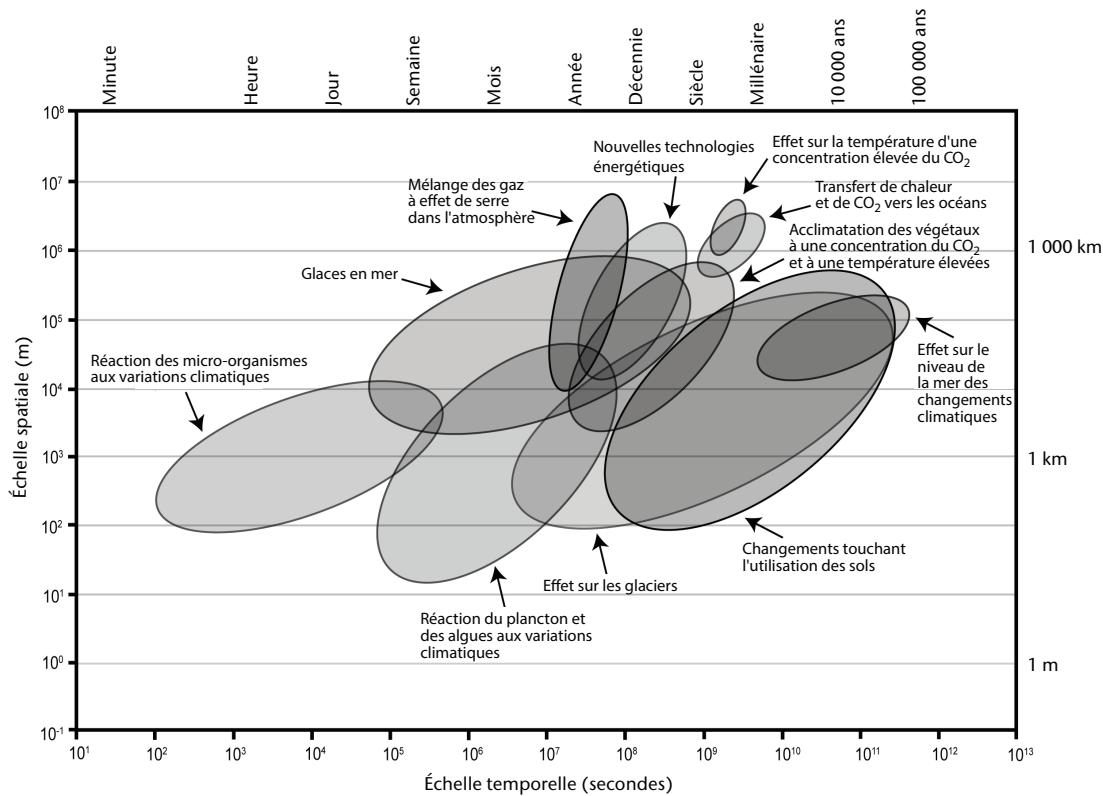


Figure 1.2 Échelles temporelle et spatiale (avec l'aimable autorisation d'Albert Todd, États-Unis d'Amérique)

une place importante dans des applications telles que l'utilisation des sols, l'irrigation et la mise en place de barrages et le choix de l'emplacement d'installations destinées à la production d'énergie naturelle ou de celui de centres de villégiature. À macro-échelle, le climat étudié est celui d'une vaste région géographique, d'un continent ou du globe dans son ensemble. Il détermine les ressources à l'échelon national et les contraintes pesant sur la production agricole et la gestion de l'eau; il est donc lié à la nature et à la portée de la santé et du bien-être. Il définit et détermine aussi les incidences des grandes composantes de la circulation planétaire, telles que le phénomène El Niño-oscillation australe (ENSO), les moussons et l'oscillation de l'Atlantique Nord.

Par échelle temporelle, on entend un intervalle de temps d'une durée pouvant se mesurer en minutes ou en heures, mais aussi en décennies ou en siècles, voire plus. Il importe de connaître les caractéristiques d'un élément environnemental sur une heure, par exemple quand il s'agit d'activités agricoles, notamment l'épandage de pesticides, ou de la surveillance de la façon dont l'énergie est utilisée pour le chauffage et la climatisation. Les caractéristiques d'un élément sur 24 heures pourront déterminer les activités humaines qu'il est possible de mener en toute sécurité. Sur plusieurs mois ou plusieurs années, le climat déterminera par exemple le choix des cultures ou la possibilité de s'approvisionner en eau potable et en nourriture. Les études portant sur des périodes relativement longues, de plusieurs décennies à plusieurs siècles, sont importantes, car elles permettent de distinguer les variations du climat causées par des phénomènes naturels tels que des modifications de la circulation atmosphérique et océanique et les variations dues aux activités humaines.

L'évolution du climat est devenue une préoccupation de premier plan pour la société. Par ses activités, en particulier l'utilisation des combustibles fossiles, l'être humain a entraîné des changements dans la composition de l'atmosphère du globe. L'augmentation marquée de la concentration troposphérique du dioxyde de carbone et du méthane pendant l'ère industrielle, mais aussi celle des émissions d'aérosols et de particules, ont des conséquences considérables pour le climat de la planète. Les chlorofluorocarbones, largement utilisés par le passé comme

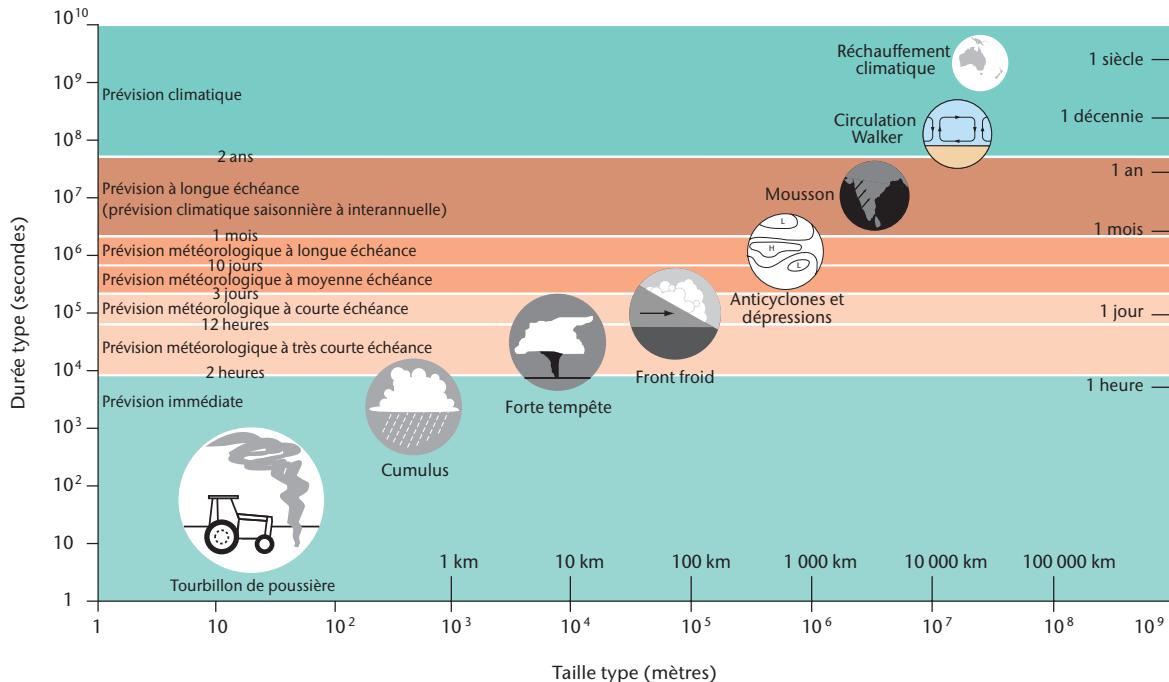


Figure 1.3. Durée de vie des phénomènes atmosphériques

Source: J.W. Zillman, *Bulletin de l'OMM*, Volume 48(2), 1999

propulseurs d'aérosols, liquides de nettoyage et frigorigènes, sont l'une des principales causes de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Plus d'un cinquième de la forêt tropicale de la planète a été rasé entre 1960 et 2000, ce qui a probablement modifié les cycles hydrologiques complexes de méso-échelle et d'échelle mondiale. Les canyons artificiels que forment les immeubles dans les villes ainsi que les surfaces goudronnées des routes augmentent la quantité de rayonnement solaire absorbé et provoquent l'apparition d'îlots de chaleur urbains. En accélérant le ruissellement des eaux de pluie, en abattant les arbres et en éliminant la végétation, on réduit la quantité de vapeur d'eau produite par la transpiration, qui ne peut donc plus atténuer la chaleur. La pollution émanant des véhicules et des bâtiments s'accumule, en particulier en période de calme atmosphérique, ce qui provoque de nombreux problèmes de santé et endommage les structures.

L'OMM est consciente des inquiétudes croissantes que soulèvent, partout dans le monde, les changements irréversibles que subit l'environnement naturel. Aussi assume-t-elle son rôle de chef de file en encourageant les études sur les changements qui touchent le système climatique et sur les effets de ces changements sur l'humanité, sur la production d'énergie et de nourriture et sur les réserves d'eau à l'échelle de la planète. L'évolution du climat et ses conséquences éventuelles, y compris les effets qui sont déjà perceptibles, sont devenues des sujets brûlants qui préoccupent les décideurs depuis quelques années. Dans certains pays, les inquiétudes qu'elles suscitent ne sont surpassées que par les questions économiques et les problèmes de défense nationale. Et même dans ces deux domaines, le climat doit être pris en compte dans la planification stratégique et la prise de décision tactique. De nombreuses conférences internationales ont été organisées afin de réfléchir aux moyens de réduire les incidences des activités humaines sur le climat et d'élaborer des stratégies visant à tirer profit du climat à des fins socio-économiques. Il s'agit notamment des conférences mondiales sur le climat qui ont eu lieu à Genève en 1979, 1990 et 2009, de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, organisée à Rio de Janeiro en 1992, et du Sommet mondial pour le développement durable tenu à Johannesburg en 2002. La création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et celle du Comité intergouvernemental de négociation d'une convention-cadre sur les changements climatiques constituent aussi des étapes importantes de l'action menée pour faire face aux changements climatiques dus aux activités humaines.

1.2.3 Utilisations de l'information et de la recherche en climatologie

La climatologie est devenue une discipline scientifique dynamique à fonctions et applications multiples. De nouvelles techniques sont mises au point, et des études sont entreprises pour savoir comment tirer parti du climat dans de nombreux domaines, notamment l'agriculture, la foresterie, les écosystèmes, l'énergie, l'industrie, la production et la distribution de biens de consommation, la construction et l'ingénierie, le bien-être de l'être humain, les transports, le tourisme, l'assurance, les ressources en eau et la gestion des catastrophes, la pêche et l'aménagement côtier. Pour que les climatologues puissent améliorer leur capacité d'informer et de conseiller les utilisateurs et de répondre à la multitude de questions qui se posent au sujet du climat, ils doivent pouvoir bénéficier de programmes de recherche durables sur le système climatique et sa forte influence, ainsi que sur les applications des connaissances climatologiques au profit de la société. Par le passé, l'étude du climat fournissait les données fondamentales, l'information et les techniques permettant de définir les climats aux échelles locale, moyenne et mondiale. Il s'agit là d'éléments primordiaux, mais qui servent aussi de fondement à des analyses plus approfondies et à des services lorsqu'ils sont couplés avec d'autres données sociales, économiques et physiques. Il est fermement établi à présent, dans diverses conventions telles que la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, qu'il est indispensable de disposer de données et de prévisions climatologiques pour la planification appliquée à l'atténuation des catastrophes et au développement durable, ainsi que dans le cadre de toutes les actions portant sur les conséquences des changements climatiques.

La climatologie appliquée tire le meilleur parti possible des connaissances et de l'information en météorologie et en climatologie pour apporter des solutions aux problèmes sociaux, économiques et environnementaux concrets. Les services climatologiques sont conçus pour divers utilisateurs des secteurs public, commercial et industriel. Les évaluations des effets de la variabilité et de l'évolution du climat sur les activités humaines, ainsi que des effets des activités humaines sur le climat, sont des facteurs importants du développement économique, de l'action sociale et de la gestion des ressources sur le plan local, national et mondial.

L'intérêt actuel pour les incidences du développement économique et d'autres activités humaines sur le climat et pour la façon dont la variabilité et l'évolution du climat influent sur les sociétés humaines souligne la nécessité de poursuivre les travaux de recherche portant sur les processus physiques et dynamiques qui régissent le système climatique et de décrire ces processus du point de vue statistique. Pour pouvoir réagir de plus en plus efficacement aux problèmes socio-économiques, il est fondamental de disposer de connaissances appropriées s'agissant de la variabilité naturelle du climat, de la sensibilité du climat aux activités humaines et de la possibilité de prévoir le temps et le climat pour des périodes allant de plusieurs jours à plusieurs décennies. La climatologie physique regroupe un large éventail d'études qui portent notamment sur les processus interactifs du système climatique. La climatologie dynamique est étroitement liée à la climatologie physique, mais porte essentiellement sur les configurations de la circulation générale de l'atmosphère. Dans les deux disciplines, il est question de décrire et d'étudier les propriétés et le comportement de l'atmosphère.

L'amélioration de la prévision du climat constitue à présent une activité importante à l'échelle mondiale. Les prévisions se fondaient à l'origine sur des techniques empiriques et statistiques, mais elles reposent désormais de plus en plus sur des techniques élargies de prévision numérique du temps. Des modèles de plus en plus complexes sont mis au point; ils simulent les éléments que sont l'atmosphère, l'océan, la surface terrestre, les glaces de mer ainsi que les aérosols et les gaz de l'atmosphère et les relient entre eux. Il est possible d'utiliser des modèles pour simuler les changements climatiques au cours de plusieurs décennies et aussi pour prévoir les variations climatiques saisonnières ou interannuelles. Les bulletins saisonniers sur l'évolution probable du climat se présentent en général sous la forme de la probabilité que la valeur d'un élément – la température moyenne ou le cumul des pluies sur une période donnée, par exemple – soit supérieure ou inférieure à la normale ou proche de celle-ci. Ces bulletins donnent à l'heure actuelle de bons résultats en matière de prévision dans les régions où la température de la mer en surface et les conditions atmosphériques sont étroitement liées, notamment dans beaucoup de régions tropicales. En raison de la nature probabiliste de ce type de prévision, il convient de cibler avec beaucoup d'attention leur diffusion et leur application. Les études portent de plus en plus sur l'intégration de l'information climatologique dans la prise de décision.

Tous les produits et services climatologiques – depuis l'information obtenue à partir de données sur les conditions climatiques et météorologiques passées jusqu'aux estimations du climat futur – qui doivent servir à la recherche, à l'exploitation, au commerce ou au domaine public s'appuient sur des données découlant de l'observation et de l'enregistrement systématiques et généralisés de plusieurs variables principales qui permettent d'établir les caractéristiques du climat à des échelles de temps très diverses. La pertinence d'un service climatologique est fortement tributaire de la densité spatiale et de l'exactitude des observations effectuées ainsi que des processus de gestion des données employés. Sans l'observation systématique du système climatique, il ne peut y avoir de services climatologiques.

Les exigences des utilisateurs s'accroissant sans cesse, le besoin de disposer d'éléments d'information d'une précision accrue et communiqués en temps voulu continue d'augmenter rapidement. Il est dans l'intérêt de tous les pays d'appliquer des pratiques cohérentes en ce qui concerne l'observation du climat, le traitement des relevés climatologiques et le maintien de la qualité et de l'utilité nécessaires des services proposés.

1.3

PROGRAMMES INTERNATIONAUX RELATIFS AU CLIMAT

La Commission de climatologie (CCI) relevant de l'OMM répond à l'ensemble des besoins des Membres de l'OMM en matière de conseils, d'assistance et de coordination dans le cadre de nombreuses activités relatives au climat. Elle œuvre depuis 1929, date à laquelle l'Organisation météorologique internationale l'a constituée, son nom ayant été légèrement modifié et son mandat ayant été ajusté en fonction de l'évolution des demandes et des priorités. Elle fixe les orientations générales de la mise en œuvre du Programme climatologique mondial au sein de l'OMM. On trouvera en annexe de plus amples précisions sur les programmes internationaux relatifs au climat.

1.4

ACTIVITÉS MONDIALES ET RÉGIONALES RELATIVES AU CLIMAT

Il incombe à tous les pays de cerner les besoins du public en information relative au climat et d'y répondre. Pour cela, il leur faut mener à bien différentes activités: observation du climat, gestion et transmission des données, prestation de différents services de données, surveillance continue du système climatique, applications pratiques et services destinés à différents groupes d'utilisateurs, prévision du climat aux échelles intrasaisonnières et interannuelles, projections climatiques, évaluations de la variabilité et de l'évolution du climat facilitant l'élaboration de politiques appropriées et détermination des priorités de la recherche pour exploiter au mieux les avantages à tirer de toutes ces activités. Beaucoup de pays, en particulier les pays en développement et les pays les moins avancés, ne disposent pas de capacités suffisantes pour assurer tous ces services. En 2009, les participants à la troisième Conférence mondiale sur le climat ont décidé d'instaurer un Cadre mondial pour les services climatologiques afin de consolider la production, l'accessibilité, la fourniture et l'application de services et de prévisions climatologiques à base scientifique. Le Cadre mondial vise à permettre à ceux qui produisent et fournissent l'information sur le climat ainsi qu'à tous les secteurs sensibles au climat dans le monde d'unir leurs efforts afin d'aider les populations du globe à relever le défi de la variabilité et de l'évolution du climat.

L'Organisation météorologique mondiale a mis sur pied un réseau de centres mondiaux de production de prévisions à longue échéance (GPCLRF) et de centres climatologiques régionaux (CCR) pour aider les Membres à répondre convenablement à leurs besoins en information sur le climat. Les définitions et les fonctions obligatoires des GPCLRF et des CCR figurent dans le *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision* (OMM-N° 485), partie I, et font partie du Règlement technique de l'OMM. Dans la partie II du Manuel figurent aussi les critères de désignation, par l'OMM, des GPCLRF, des CCR et d'autres centres opérationnels.

Les GPCLRF désignés produisent des prévisions mondiales à longue échéance selon les critères définis dans le *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision*; ils sont reconnus

par l'OMM sur la base de la recommandation de la Commission des systèmes de base. En outre l'OMM a mis en place deux centres principaux, à savoir le Centre principal pour les prévisions d'ensemble multimodèle à longue échéance et le Centre principal du système de vérification normalisée des prévisions à longue échéance, qui apportent une valeur ajoutée aux services opérationnels fournis par les GPCLRF.

Les CCR ont été créés pour aider les Membres de l'OMM d'une Région donnée à améliorer la qualité et la cohérence des services et produits climatologiques qu'ils proposent, notamment dans le domaine des prévisions régionales à longue échéance, et à renforcer leur capacité de satisfaire les besoins nationaux en matière d'information climatologique. Les principaux clients des CCR sont les SMHN et les autres CCR se trouvant dans la Région et les zones avoisinantes. Les services et produits des CCR sont fournis aux SMHN, qui leur apportent davantage de précision avant de les diffuser. Les CCR ne distribuent pas leurs produits et services directement aux utilisateurs sans l'accord préalable des SMHN de la Région. Les compétences d'un CCR n'empiètent pas sur celles des SMHN, ni ne s'y substituent. Il importe de noter que la liaison avec les groupes d'utilisateurs nationaux et la diffusion de bulletins météorologiques et d'avis relèvent du mandat et de la compétence des SMHN et que tous les CCR sont tenus de respecter les principes de la résolution 40 (Cg-XII) de l'OMM concernant l'échange de données et de produits.

La série complète des produits et services émanant des CCR peut varier d'une Région à l'autre en fonction des priorités fixées par le Conseil régional compétent. Certaines fonctions essentielles sont cependant remplies par tous les CCR désignés par l'OMM, et ce en application des critères établis afin qu'une certaine uniformité des services fournis par les CCR soit garantie partout dans le monde. Ces fonctions sont les suivantes:

- a) L'exécution d'activités opérationnelles relevant de la prévision à longue échéance, y compris l'interprétation et l'évaluation des produits pertinents fournis par les GPCLRF, l'élaboration de produits adaptés aux besoins régionaux et sous-régionaux et la rédaction de déclarations consensuelles sur les prévisions régionales et sous-régionales;
- b) La surveillance du climat, y compris l'établissement de diagnostics climatiques à l'échelle régionale et sous-régionale, l'analyse de la variabilité du climat et des extrêmes climatiques et la mise en place d'une veille régionale des phénomènes climatiques extrêmes;
- c) La prestation de services de données à l'appui de la prévision à longue échéance, y compris l'élaboration de jeux de données climatologiques régionaux;
- d) La formation à l'utilisation des produits et services opérationnels des CCR.

Outre ces fonctions obligatoires dont doivent s'acquitter les CCR, plusieurs autres activités sont hautement recommandées, notamment la réduction d'échelle des scénarios de l'évolution du climat, la prestation de services de données non opérationnels, en particulier le sauvetage et l'uniformisation des données, des fonctions de coordination, des activités de formation et de renforcement des capacités et des activités de recherche et développement.

Considérant que l'information climatologique peut être d'une grande utilité pour l'adaptation à la variabilité du climat et aux changements climatiques et l'atténuation de leurs effets, l'OMM a contribué à la création des forums régionaux sur l'évolution probable du climat. Reposant sur une approche essentiellement consensuelle, ces forums ont la responsabilité primordiale de produire et de diffuser des évaluations concernant l'état présent du climat au niveau régional et son évolution au cours de la saison à venir. Ils réunissent, sur une base opérationnelle, des spécialistes nationaux, régionaux et internationaux du climat chargés de formuler des perspectives d'évolution du climat à l'échelle régionale en se fondant sur les éléments d'information fournis par les SMHN, les institutions régionales, les CCR et les GPCLRF. Ils favorisent et améliorent les retours d'information entre utilisateurs et spécialistes du climat et facilitent la mise au point de produits adaptés aux besoins des utilisateurs. Ils permettent d'analyser aussi les obstacles à l'emploi de l'information climatologique, de partager les enseignements tirés de l'utilisation de produits diffusés antérieurement et d'affiner les applications destinées aux différents secteurs. Ces forums régionaux donnent souvent lieu à l'organisation de forums nationaux au cours

desquels les spécialistes précisent l'évolution probable du climat et donnent des informations sur les risques afférents à l'échelle nationale, y compris en ce qui concerne les messages d'alerte, à l'intention des décideurs et du grand public.

Le processus propre aux forums régionaux sur l'évolution probable du climat peut varier suivant la région, mais comporte habituellement au moins la première des activités ci-après et, dans certains cas, les quatre:

- a) Des réunions de spécialistes régionaux et internationaux du climat, chargés de dégager un consensus concernant les perspectives d'évolution du climat à l'échelle régionale, habituellement sous une forme probabiliste;
- b) Un forum plus important, réunissant des climatologues et des représentants des secteurs utilisateurs aux fins de présentation de prévisions consensuelles sur l'évolution probable du climat, d'analyse et de détermination des incidences et conséquences prévues par secteur et de formulation de stratégies de parade;
- c) Des stages de formation sur la prévision climatique saisonnière visant à renforcer les capacités des climatologues à l'échelon national et régional;
- d) Des séances de sensibilisation spéciales, avec la participation de spécialistes des médias, à des fins d'élaboration de stratégies efficaces de communication.

1.5 ACTIVITÉS NATIONALES RELATIVES AU CLIMAT

Dans la plupart des pays et depuis longtemps, la responsabilité des activités nationales relatives au climat incombe essentiellement aux SMHN. Ces activités comprennent la réalisation, le contrôle de la qualité et l'archivage d'observations climatologiques; la diffusion de l'information climatologique; la recherche sur le climat; la prévision climatique; et les applications des connaissances sur le climat. Il faut noter cependant que les universités et les entreprises du secteur privé contribuent de plus en plus à ces activités.

Dans certains pays, les SMHN disposent d'un seul service chargé de l'ensemble des activités climatologiques. Dans d'autres pays, on a estimé qu'il était préférable de répartir la responsabilité des différentes activités climatologiques (notamment l'observation, la gestion des données et la recherche) entre différentes entités au sein des SMHN. La répartition des responsabilités peut être réalisée en fonction de compétences communes, par exemple entre l'analyse synoptique et l'observation du climat ou encore entre les travaux de recherche concernant la prévision météorologique et la prévision climatique. Dans certains cas, des pays créent des bureaux par secteur géographique ou par secteur d'activité pour qu'ils se chargent des activités menées au niveau infranational, alors que dans d'autres cas, la mise commun et la conservation des compétences nécessaires à certaines activités s'effectuent par l'intermédiaire d'une entité de coopération régionale destinée à répondre aux besoins d'un groupe de pays.

Lorsque les responsabilités sont réparties au sein d'un SMHN ou qu'elles incombent à une autre institution, il est indispensable que des relations étroites soient établies entre ceux qui se chargent de l'acquisition et de la gestion des observations et ceux qui ont pour fonction d'appliquer les données climatologiques à la recherche ou aux services. Ces relations sont déterminantes, car elles permettent de veiller à ce que les réseaux, mais aussi le contenu et le contrôle de la qualité des observations, soient satisfaisants. Il est également indispensable que le personnel soit formé pour remplir les fonctions qui lui incombent, de sorte que les activités climatologiques soient menées à bien avec autant d'efficacité que dans le cas d'un centre ou autre entité climatologique intégré. Si le traitement des données est réparti entre plusieurs lieux, il importe de créer une autorité de coordination qui veille à ce que les jeux de données ne présentent pas de divergences. Au sein d'un SMHN, les climatologues devraient être directement chargés des activités ci-après ou alors devraient fournir des conseils et avis à leur sujet:

- a) Planification des réseaux de stations;

- b) Choix de l'emplacement des stations climatologiques, notamment en cas de changement de lieu d'implantation;
- c) Entretien et sécurité des stations d'observation;
- d) Inspection régulière des stations;
- e) Sélection et formation des observateurs;
- f) Choix des instruments ou systèmes d'observation à installer pour veiller à la représentativité et à l'homogénéité des relevés obtenus (voir le chapitre 2).

Une fois les données d'observation recueillies, il convient d'en assurer la gestion. Parmi les fonctions que regroupe la gestion de l'information provenant des stations d'observation, citons l'acquisition des données et des métadonnées, le contrôle de la qualité, le stockage, l'archivage et l'accès (voir le chapitre 3). Il faut aussi assurer la diffusion de l'information recueillie au sujet du climat. Un SMHN doit pouvoir anticiper, étudier et comprendre les besoins en information climatologique des pouvoirs publics, des ministères, des institutions de recherche et des universités, du secteur du commerce, de celui de l'industrie et du grand public; il doit également être à même de promouvoir l'utilisation de l'information et d'en assurer la commercialisation, de proposer son expertise pour interpréter les données et de fournir des conseils sur l'utilisation des données (voir les chapitres 6 et 7).

Un SMHN devrait assurer le bon fonctionnement d'un programme de recherche et de développement ou alors entretenir des relations de travail avec une institution qui dispose de capacités de recherche et développement en lien direct avec ses fonctions et activités climatologiques. Le programme de recherche devrait examiner les applications et produits climatologiques qui améliorent, auprès des utilisateurs, la compréhension et l'application de l'information climatologique.

Il convient également d'entreprendre des études pour rechercher de nouvelles méthodes – ou améliorer l'efficacité des méthodes existantes – appliquées à la gestion d'un volume de données qui ne cesse de s'accroître, à l'accès par les utilisateurs des données archivées et à la numérisation des données. Il y a lieu aussi d'évaluer régulièrement les programmes d'assurance de la qualité s'appliquant aux observations et aux résumés climatologiques, dans le but de mettre au point des techniques meilleures et plus rapides. Il faudrait enfin faire progresser l'utilisation des plates-formes de diffusion de l'information, notamment l'Internet.

Pour pouvoir faire face aux responsabilités qui lui incombent sur le plan national et international et renforcer ses capacités en matière d'activités climatologiques, un SMHN doit impérativement disposer d'un personnel qualifié. Il lui appartient par conséquent d'entretenir des liens avec des établissements de formation et de recherche en climatologie, notamment appliquée, voire de développer de tels liens. Il doit en particulier veiller à ce que son personnel suive des programmes de formation qui complètent la formation générale en météorologie par des cours portant sur les compétences propres à la climatologie. Le Programme d'enseignement et de formation professionnelle de l'OMM favorise et soutient la collaboration internationale instaurée notamment en vue d'élaborer une série de moyens permettant d'assurer une formation continue, à savoir des bourses, des conférences, des visites d'information, l'apprentissage en ligne, les cours de formation et le transfert de technologie vers les pays en développement. En outre, d'autres programmes de l'OMM, dont le Programme climatologique mondial, le Programme d'hydrologie et de mise en valeur des ressources en eau et le Programme de météorologie agricole, entreprennent des activités de renforcement des capacités relatives au climat (données, surveillance, prévision, applications et services). Pour donner de bons résultats, un programme national de services climatologiques doit posséder une structure qui fonctionne efficacement dans le pays considéré. La structure doit permettre de relier les applications disponibles, la recherche scientifique, les capacités technologiques et les communications dans un système unifié. Les composantes essentielles d'un programme national de services climatologiques sont les suivantes:

- a) Mécanismes permettant de veiller à ce que les besoins de tous les utilisateurs en matière d'information et de prévision climatologiques soient pris en compte;
- b) Collecte d'observations météorologiques et connexes, gestion de bases de données et fourniture de données;
- c) Coordination des activités de recherche scientifique dans les domaines météorologique, océanographique, hydrologique et connexes aux fins d'amélioration des services climatologiques;
- d) Études pluridisciplinaires visant à déterminer les risques à l'échelle d'un pays et la vulnérabilité à l'échelle d'un secteur ou d'un groupe de population donné à l'égard de la variabilité et de l'évolution du climat, pour qu'il soit possible de formuler des stratégies de parade et de recommander des politiques nationales;
- e) Élaboration et fourniture de services d'information et de prévision climatologiques visant à satisfaire les besoins des utilisateurs;
- f) Liens avec d'autres programmes présentant des objectifs similaires ou connexes visant à éviter que les efforts déployés se chevauchent inutilement.

Il faut bien se dire qu'un programme national de services climatologiques relève d'un processus continu qui peut donc changer de structure avec le temps. L'analyse permanente et la prise en compte des besoins et des retours d'information des utilisateurs en vue de la mise au point de produits et de services utiles font partie intégrante de ce processus. Pour élaborer ce programme, il est indispensable de recenser les besoins et prescriptions techniques en question. Les utilisateurs peuvent contribuer au processus en évaluant les produits, ce qui conduit invariablement à des ajustements et à des améliorations. Il peut se révéler difficile de mesurer les avantages qu'apporte l'application des produits, mais l'interaction avec les utilisateurs, par le biais d'ateliers, de stages de formation ou d'autres activités de communication, facilite le processus. Le fait de disposer de documents étayant les besoins des utilisateurs et faisant état de leur opinion positive permet d'établir le bien-fondé d'un programme national de services climatologiques ou de dûment justifier des demandes d'aide financière internationale concernant divers aspects du programme. L'approbation documentée du programme par un ou plusieurs groupes représentatifs d'utilisateurs constitue un élément essentiel quand il s'agit d'orienter les activités futures ou de faire la promotion du service en tant qu'entité d'une utilité incontestable.

1.6 GESTION DE LA QUALITÉ

La mise en place d'un système de gestion de la qualité est l'un des moyens d'assurer le bon fonctionnement des programmes nationaux de services climatologiques. Beaucoup de SMHN s'emploient à réaliser des observations de qualité et, à terme, à fournir des produits et des services de qualité. Si l'on connaît donc bien la notion de qualité, on en sait peut-être un peu moins sur sa mise en pratique dans un système. Par définition, un système de gestion de la qualité est un ensemble de politiques, de processus et de procédures requis pour la planification et l'exécution des principaux processus opérationnels aux fins d'amélioration des résultats des SMHN. Un système de gestion de la qualité permet aux organismes de recenser, d'évaluer, de contrôler et d'améliorer les principaux processus opérationnels, ce qui aura finalement pour effet d'améliorer les résultats obtenus et d'accroître la satisfaction des clients.

Il appartient au SMHN de déterminer les composantes du système de gestion de la qualité, ainsi que ses buts et objectifs. Un système de gestion de la qualité fondé sur une norme internationale telle que celle établie par l'ISO est particulièrement utile, car il fait valoir un certain nombre d'exigences qui peuvent être adoptées en vue de faire progresser la qualité au sein des SMHN. Il offre en outre la possibilité d'un audit externe des processus et assure donc une validation indépendante du système. L'adoption de la norme ISO 9001:2015, *Systèmes de management de la qualité*, assurera une qualité délibérément établie, ce qui est préférable à toute démarche consistant à s'en remettre à la chance pour y parvenir.

Pour mettre au point un système de gestion de la qualité fondé sur la norme ISO 9001:2015, il convient de tenir compte des principes suivants:

- Orientation client;
- Leadership;
- Implication du personnel;
- Approche processus;
- Amélioration;
- Prise de décision fondée sur des preuves;
- Management des relations avec les parties intéressées.

L'approche qui sous-tend la norme ISO 9001:2015 relative à la gestion de la qualité est fondée sur la gestion des processus et de leurs interactions au moyen de ce qu'on appelle le cycle PDCA (*Plan-Do-Check-Act* (Planifier-Réaliser-Vérifier-Agir)). Ce cycle consiste en premier lieu à établir les objectifs et les processus tout en tenant compte des ressources disponibles pour répondre aux exigences des clients. Ce qui a été planifié est alors mis en œuvre, et l'on vérifie les résultats obtenus (produits, services, etc.) pour s'assurer qu'ils correspondent bien au plan défini. Si des améliorations sont constatées, elles sont alors examinées, et le cycle entier se répète. Durant le cycle, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des risques et des opportunités pour améliorer l'efficacité du système.

Un système de gestion de la qualité présente les avantages suivants:

- Cohérence dans la diffusion de produits et de services de qualité;
- Aide à la satisfaction des besoins des clients;
- Efficacité accrue des méthodes de travail, permettant d'économiser du temps, de l'argent et des ressources;
- Amélioration des résultats opérationnels découlant d'une limitation des erreurs;
- Motivation et participation du personnel grâce à des processus internes plus efficaces;
- Facilitation et détermination des possibilités de formation;
- Contribution à la détermination des risques et des possibilités.

Un système de gestion de la qualité facilite la coordination et l'orientation des activités d'un organisme de sorte que celui-ci puisse répondre aux besoins des clients et aux exigences réglementaires et améliorer en permanence son efficacité et son efficience. Il faut donc que ce soit un système de bout en bout qui prenne en compte l'ensemble des activités, depuis les mesures et observations brutes jusqu'aux services fournis aux utilisateurs finals. Un tel système vise à améliorer la qualité et la performance afin de répondre ou de dépasser les attentes des clients tout en tenant compte du contexte propre aux SMHN ainsi que des attentes et exigences des parties intéressées. Un système de gestion de la qualité est par conséquent un élément important des pratiques climatologiques des SMHN et joue un rôle clé dans l'amélioration de la qualité tout au long de la chaîne de valeur, depuis la mise en place des instruments jusqu'à la production des produits et services climatologiques en passant par le stockage et le contrôle de la qualité des données. Cette chaîne de valeur est renforcée par les personnes directement concernées; si aucune de ces personnes n'intervient dans chacun des aspects de la chaîne, leurs compétences sont nécessaires pour atteindre les objectifs fixés (*Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume I).

La mise en place d'un système de gestion de la qualité peut donc améliorer la prestation de services climatologiques assurée par les SMHN, et il est recommandé d'utiliser la norme ISO 9001:2015 à cet effet. Les SMHN seront ainsi en mesure de recenser et de satisfaire les besoins de leurs clients grâce à l'ensemble complet de réglementations techniques et de documents d'orientation de l'OMM, qui servent de fondement solide pour le fonctionnement des SMHN et le respect des exigences réglementaires nationales et internationales, mais aussi à l'application des principes de gestion de la qualité. Ils pourront également surveiller et mesurer leur propre performance, détecter et atténuer les risques et recenser les possibilités d'améliorer en permanence la prestation de leurs services. Ce faisant, ils seront à même de faire une demande de certification accréditée selon une norme ISO.

On trouvera une description détaillée d'un système de gestion de la qualité et de sa mise en place dans un Service météorologique dans le *Guide sur la mise en œuvre de systèmes de gestion de la qualité pour les Services météorologiques et hydrologiques nationaux et autres prestataires de services concernés* (OMM-N° 1100). Cette publication se révèlera d'un grand intérêt pour les SMHN souhaitant mettre en place un système de gestion de la qualité. La publication intitulée *Guidelines on Quality Management in Climate Services (WMO-No. 1221)*, élaborée par la Commission de climatologie de l'OMM, fournit de plus amples informations sur la mise en œuvre de la gestion de la qualité dans le cadre des services climatologiques. Les sites Web ci-après peuvent aussi s'avérer utiles: <http://qmc.mgm.gov.tr> et http://www.bom.gov.au/wmo/quality_management/qm_publications.shtml.

BIBLIOGRAPHIE

- Aristote, environ 350 av. J.-C.: *Météorologiques*.
- Bergeron, T., 1930: Richtlinien einer dynamischen Klimatologie. *Meteorologische Zeitung*, 47:246-262.
- Fedorov, E.E., 1927: Climate as totality of the weather. *Monthly Weather Review*, 55:401-403.
- Geiger, R., 1927: *Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie*. Quatrième édition, 1961. Braunschweig, Vieweg.
- Hadley, G., 1735: Concerning the cause of the general trade-winds. *Philosophical Transactions*, 39, 58-62.
- Hippocrate, vers 400 av. J.-C.: *Des airs, des eaux et des lieux*, consultable à l'adresse <http://classics.mit.edu//Hippocrates/airwatpl.html>.
- Köppen, W., 1918: Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 64:193-203, 243-248.
- Köppen, W. et R. Geiger, 1936: Das geographische System der Klimate, dans *Handbuch der Klimatologie*, Volume 1, partie C. Berlin, Borntraeger.
- Organisation internationale de normalisation, 2015: ISO 9001:2015, Systèmes de management de la qualité – Exigences.
- Organisation météorologique mondiale, 2015: *Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume I: Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées, mise à jour 2017. Genève.
- , 2017: *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision* (OMM-N° 485). Genève.
- , 2017: *Guide sur la mise en œuvre de systèmes de gestion de la qualité pour les Services météorologiques et hydrologiques nationaux et autres prestataires de services concernés* (OMM-N° 1100). Genève.
- Thorntwaite, C.W., 1948: An Approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1):55-94.
- Von Hann, J., 1908: *Handbuch der Klimatologie*, trois volumes. Stuttgart, Englehorn.
- Walker, G.T., 1923-24: World weather, I et II. *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, 24(4):9.

AUTRES LECTURES

- Burroughs, W., 2003: *Climate: Into the 21st Century*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Geiger, R., R.H. Aron et P. Todhunter, 2003: *The Climate Near the Ground*. Sixième édition. Lanham, Maryland, Rowman and Littlefield Publishers.
- Global Climate Observing System (GCOS), 2004: *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO-TD No. 1219, GCOS-92). Genève.
- , 2010: *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1523, GCOS-138). Genève.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2004: *16 Years of Scientific Assessment in Support of the Climate Convention*, Genève.
- , 2007: *Quatrième Rapport d'évaluation: Changements climatiques 2007*, Volumes 1 à 3. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Groupe sur l'observation de la Terre (GEO), 2005: Global Earth Observation System of Systems (GEOSS): 10-year Implementation Plan Reference Document. GEO 1000R/ESA SP-1284. Noordwijk, Division des publications de l'Agence spatiale européenne, ESTEC.
- , 2008: *GEO 2007–2009 Work Plan – Toward Convergence*. Genève.
- Integrated Global Observing Strategy (IGOS), 2007: *Cryosphere Theme Report: For the Monitoring of our Environment from Space and from Earth* (WMO-TD No. 1405). Genève.
- Landsberg, H., 1962: *Physical Climatology*. Dubois, Pennsylvanie, Gray Printing.
- Mann, M.E., R.S. Bradley et M.K. Hughes, 1999: Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 26(6):759.
- McGregor, G.R., 2006: Climatology: Its scientific nature and scope. *International Journal of Climatology*, 26 (1):1-5.
- , 2015: Climatology in support of climate risk management: A progress report. *Progress in Physical Geography*, 39:536-553.
- Organisation météorologique mondiale, 1986: *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (Villach, Autriche, 9-15 octobre 1985) (WMO-No. 661). Genève.

- , 1990: *Forty Years of Progress and Achievement: A Historical Review of WMO* (Sir Arthur Davies, éd.) (WMO-No. 721). Genève.
- , 1990: *L'OMM et son œuvre – Quarante ans au service de la météorologie et de l'hydrologie internationales* (OMM-N° 729), Genève.
- , 1992: *Vocabulaire météorologique international* (OMM-N° 182), Genève.
- , 1997: *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel*, Troisième session (Tokyo, Japon, 15-18 juillet 1997) (WMO/TD-No. 847, GCOS-39, GOOS-11, GTOS-11). Genève.
- , 2000: *OMM – 50 ans d'activité* (OMM-N° 912). Genève.
- , 2003: *Proceedings of the Meeting on Organization and Implementation of Regional Climate Centres* (Genève, 27-28 novembre 2003) (WMO/TD-No. 1198, WCASP-No. 62), Genève.
- , 2005: *The World Climate Research Programme Strategic Framework 2005–2015. Coordinated Observation and Prediction of the Earth System (COPES)* (WMO/TD-No. 1291, WCRP-123). Genève.
- , 2008: *Report of the CCI/CBS Intercommission Technical Meeting on Designation of Regional Climate Centres* (Genève, 21-22 janvier 2008) (WMO-TD No. 1479, WCASP-No. 77). Genève.
- , 2009: *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2008* (OMM-N° 1039). Genève.
- , 2011: *Guide du système de gestion de la qualité dans le domaine de l'assistance météorologique à la navigation aérienne internationale* (OMM-N° 1001), mise à jour 2014; guide élaboré conjointement par l'OMM et l'OACI.
- , 2016: *Rapport final abrégé, résolutions et décisions de la soixante-huitième session du Conseil exécutif* (OMM-N° 1168), résolution 5 (EC-68) – Compétences en matière de prestation de services climatologiques. Genève.
-

CHAPITRE 2. OBSERVATIONS, STATIONS ET RÉSEAUX CLIMATOLOGIQUES

2.1 INTRODUCTION

Toutes les activités climatologiques nationales, y compris la recherche et les applications, se fondent principalement sur des observations de l'état de l'atmosphère ou du temps. Le Système mondial d'observation fournit des observations sur l'état de l'atmosphère et de la surface des océans. Son fonctionnement est assuré par les Services météorologiques et hydrologiques nationaux, les exploitants de satellites nationaux ou internationaux et divers organismes et groupements s'occupant de systèmes d'observation ou de zones géographiques spécifiques. Le Système mondial d'observation de l'OMM est un système coordonné, comprenant différents sous-systèmes d'observation et dont l'objectif est de fournir, de manière économique et efficace, des données d'observation normalisées et de qualité relatives à la météorologie ou aux domaines connexes de la géophysique et de l'environnement, recueillies dans toutes les parties du globe et de l'espace extra-atmosphérique. Voici des exemples de sous-systèmes d'observation utiles à la climatologie: le Réseau de stations d'observation en surface pour le Système mondial d'observation du climat (SMOC) (GSN), le Réseau de stations d'observation en altitude pour le SMOC (GUAN), le Réseau aérologique de référence du SMOC (GRUAN), les réseaux climatologiques de base régionaux, la Veille de l'atmosphère globale (VAG), les systèmes d'observation maritime et le Système de positionnement global par satellite. Les observations émanant de ces réseaux et de ces stations sont nécessaires à l'élaboration en temps réel d'analyses, de prévisions et d'avis météorologiques et climatologiques et à celle de services climatologiques ou encore à des fins de recherche, et ce à l'appui de l'ensemble des programmes de l'OMM et des programmes environnementaux pertinents d'autres organisations internationales.

Le présent chapitre relatif aux observations indique les paramètres à mesurer pour décrire le climat, les caractéristiques des stations où ces paramètres sont mesurés, les instruments de mesure requis, le choix de l'emplacement des stations et la configuration et les fonctions des réseaux. Les indications fournies sont tirées des ouvrages qui suivent: le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8), le *Guide du Système mondial d'observation* (OMM-N° 488), la publication intitulée *Guidelines on Climate Observation Networks and Systems* (WMO/TD-No. 1185) et le *Manuel du Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM* (OMM-N° 1160). Le thème central est légèrement différent dans chacune des éditions du *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques*. La sixième édition (OMM, 1996), par exemple, contient des indications utiles sur l'étalonnage des capteurs, en particulier pour les instruments de base qui équipent les stations climatologiques, tandis que les tableaux 2 et 3 de la cinquième édition (OMM, 1983) fournissent davantage de détails sur les exigences de précision dans les mesures effectuées à des fins climatologiques d'ordre général. Dans les sections qui suivent, le lecteur trouvera des renvois à d'autres publications de l'OMM qui contiennent davantage d'indications précises.

Les indications données dans le présent chapitre s'appuient aussi sur les dix principes relatifs à la surveillance du climat présentés dans le document intitulé *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel* (WMO/TD-No. 847), à savoir:

1. Évaluer, avant le stade de la mise en œuvre, l'incidence des nouveaux systèmes ou des éventuelles modifications des systèmes existants;
2. Lors de la transition entre les anciens et les nouveaux systèmes, prévoir une période d'exploitation en parallèle, d'une durée suffisante;
3. Recueillir et traiter avec soin non seulement les données elles-mêmes, mais aussi les renseignements et l'historique relatifs aux conditions locales, aux instruments, aux

- modalités d'exploitation, aux algorithmes de traitement des données et aux autres facteurs entrant en ligne de compte dans l'interprétation des données (c'est-à-dire les métadonnées);
4. Procéder à l'évaluation systématique de la qualité et de l'homogénéité des données;
 5. Tenir compte, en fixant les priorités nationales, régionales et mondiales en matière d'observation, des besoins en produits et en évaluations concernant la surveillance du climat et de l'environnement;
 6. Maintenir en service les stations et systèmes d'observation dont l'exploitation n'a jamais été interrompue;
 7. En matière d'observations additionnelles, accorder une priorité élevée aux régions déficitaires en données, aux paramètres faisant l'objet d'observations insuffisantes, aux régions particulièrement sensibles aux changements et aux mesures de première importance présentant une résolution temporelle peu satisfaisante;
 8. Dès la phase initiale de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux systèmes, préciser les besoins à long terme à l'intention des concepteurs et des exploitants de réseaux et des spécialistes des instruments;
 9. S'agissant des systèmes d'observation à des fins de recherche, préparer soigneusement leur adaptation à une phase d'exploitation prolongée;
 10. Veiller à ce que les systèmes de gestion des données qui facilitent l'accès aux données et aux produits ainsi que leur utilisation et leur interprétation fassent partie intégrante des systèmes de surveillance du climat.

Ces principes ont été établis avant tout pour les observations en surface, mais ils s'appliquent aussi aux données provenant de toutes les plates-formes d'observation. On trouvera dans la section 2.3.4 des principes complémentaires s'appliquant spécifiquement aux observations par satellite.

2.2 ÉLÉMENTS CLIMATIQUES

On entend par élément climatique toute propriété du système climatique décrite dans la section 1.2.2. Combinées à d'autres éléments, ces propriétés permettent de décrire le temps ou le climat d'un lieu sur une période d'une durée donnée. Tout élément météorologique observé peut aussi être considéré comme un élément climatique. Les éléments les plus communément employés en climatologie sont les suivants: la température de l'air (y compris les maximums et les minimums), les précipitations (pluie, chute de neige et tous les types de dépôts humides tels que la grêle, la rosée, le givre, la gelée blanche et les précipitations de brouillard), l'humidité, le mouvement atmosphérique (vitesse et direction du vent), la pression atmosphérique, l'évaporation, l'insolation et le temps présent (brouillard, grêle, tonnerre, etc.). Les propriétés propres aux terres émergées en surface et sous la surface (y compris les éléments hydrologiques, la topographie, la géologie et la végétation), celles des océans et celles de la cryosphère servent aussi à décrire le climat et sa variabilité.

Dans les sous-sections ci-après sont décrits les éléments habituellement observés pour des types particuliers de stations et de réseaux de stations. Des indications détaillées figurent dans le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), dans le *Règlement technique* (OMM-N° 49, en particulier dans le Volume III) et dans le *Guide des pratiques de météorologie agricole* (OMM-N° 134). Il convient de garder ces documents à portée de main pour pouvoir les consulter en cas de besoin.

2.2.1 Éléments en surface et sous la surface

Une station climatologique ordinaire se situe sur un terrain présentant les conditions requises pour l'observation de la température maximale et minimale quotidienne et de la hauteur de précipitation. Une station climatologique principale assure en général l'observation d'un plus large éventail de paramètres météorologiques: le vent, les caractéristiques des nuages, l'humidité, la température, la pression atmosphérique, les précipitations, l'enneigement, l'insolation et le rayonnement solaire. Afin de pouvoir établir une climatologie des précipitations, du vent ou de tout autre élément en particulier, il est parfois nécessaire d'exploiter une station spécialement destinée à l'observation d'un élément ou d'un sous-ensemble d'éléments, en particulier dans les zones où la topographie varie. Les stations climatologiques de référence (voir 2.5) fournissent des données homogènes sur de longues périodes afin qu'il soit possible de déterminer les tendances climatiques. Il serait souhaitable que chaque pays dispose d'un réseau de ces stations, représentatif des zones climatiques principales et des régions vulnérables.

Dans les zones urbaines, les conditions atmosphériques revêtent une importance particulière en raison des conséquences qu'elles peuvent avoir. De fortes pluies peuvent causer de graves inondations; la neige et la pluie se congelant peuvent perturber les réseaux de transport; les orages violents, qui s'accompagnent de foudre, de grêle et de vents forts, peuvent entraîner des pannes de courant. Les vents violents peuvent aussi ralentir voire stopper la circulation des automobiles, des autocaravanes, des autorails, des véhicules de transport en commun et des poids lourds. Les zones urbaines sont particulièrement vulnérables face aux tempêtes tropicales qui pénètrent à l'intérieur des terres, compte tenu des fortes concentrations de population à risque, de la densité élevée d'ouvrages édifiés par l'homme et du risque accru d'inondation et de contamination de l'eau potable. Les stations urbaines observent habituellement les mêmes éléments que les stations climatologiques principales et recueillent en plus des données sur la pollution atmosphérique, notamment les concentrations d'ozone près de la surface, d'autres substances chimiques et de particules.

Les observations maritimes sont en général de deux sortes: physico-dynamiques ou biochimiques. Les éléments physico-dynamiques (notamment le vent, la température, la salinité, les vagues du vent et la houle, les glaces de mer, les courants océaniques et le niveau de la mer) jouent un rôle actif dans l'évolution du système marin. Les éléments biochimiques (notamment l'oxygène dissous, les éléments nutritifs et la biomasse phytoplanctonique) ne participent généralement pas de façon active aux processus physico-dynamiques, sauf peut-être à des échelles de temps relativement longues, et sont donc qualifiés d'éléments passifs. Du point de vue de la plupart des SMHN, un degré de priorité élevé devrait être en général accordé aux éléments physico-dynamiques, bien que dans certains cas les éléments biochimiques puissent revêtir de l'importance quand il s'agit de répondre aux besoins de certaines parties prenantes (par exemple, les observations en rapport avec le rôle du dioxyde de carbone dans les changements climatiques).

Certains SMHN, qui sont aussi chargés de la surveillance des phénomènes hydrologiques, de la planification en hydrologie ou encore de la prévision et des alertes hydrologiques, sont alors tenus d'observer et de mesurer les éléments propres à l'hydrologie. Ces éléments peuvent comprendre différentes combinaisons des paramètres suivants: hauteur de cours d'eau, de lacs ou de réservoirs; débit; transport solide et dépôt; taux de prélèvement et de recharge; température de l'eau et de la neige; couche de glace; propriétés chimiques de l'eau; évaporation; humidité du sol; niveau des nappes; étendue des inondations. Ces éléments définissent une partie intégrante du cycle hydrologique et jouent un rôle important dans la variabilité du climat.

À ces éléments observés en surface s'ajoutent des éléments mesurés sous la surface tels que la température et l'humidité du sol, qui sont particulièrement importants pour les applications en matière d'agriculture, de foresterie, de planification de l'utilisation des terres et d'aménagement du territoire. Il convient en outre de mesurer d'autres éléments pour établir les caractéristiques de l'environnement physique dans le cadre d'applications agricoles, notamment l'évaporation au-dessus du sol et des plans d'eau, l'insolation, le rayonnement de faible et de grande longueur d'onde, la transpiration des plantes, le ruissellement et la hauteur de la nappe phréatique ainsi que les conditions météorologiques (en particulier la grêle, la foudre, la rosée et le brouillard). Idéalement, les mesures des éléments qui importent pour l'agriculture devraient être effectuées

à plusieurs hauteurs allant de 200 cm sous la surface du sol à 10 m au-dessus de cette surface. Pour déterminer ces hauteurs, il convient de tenir compte de la nature de la végétation, cultivée ou non.

Par données indirectes, on entend des données obtenues par la mesure de conditions ayant un lien indirect avec le climat, notamment la phénologie ou l'étude des carottes de glace, des varves (dépôts annuels de sédiments), des récifs coralliens ou des cernes de croissance des arbres. La phénologie étudie la chronologie des phénomènes biologiques périodiques propres au règne animal et végétal, les causes de cette chronologie au regard des forces biotiques et abiotiques en jeu et les relations entre les stades de développement d'une même espèce ou d'espèces différentes. La feuillaison et la floraison au printemps, la fructification, le changement de couleur et la chute des feuilles à l'automne, ainsi que l'arrivée et le départ des oiseaux, des insectes et autres animaux migrateurs sont tous des exemples de marqueurs phénologiques. La phénologie offre un moyen facile et économique de détecter rapidement les changements que subit la biosphère et complète donc utilement les mesures instrumentales effectuées par les Services météorologiques nationaux.

Une carotte glaciaire est constituée de neige et de glace ayant piégé des bulles d'air. La composition d'une carotte, en particulier la présence d'isotopes d'hydrogène et d'oxygène, est fonction du climat qui régnait au moment où la glace et la neige se sont déposées. Les carottes de glace contiennent aussi des inclusions telles que des poussières et des cendres portées par le vent, des bulles de gaz atmosphériques ainsi que des substances radioactives contenues dans la neige déposée chaque année. Diverses propriétés que l'on peut observer le long d'une carotte fournissent des données indirectes sur la température, le volume des océans, les précipitations, la chimie et la composition gazeuse de la basse atmosphère, les éruptions volcaniques, la variabilité du rayonnement solaire, la productivité de la mer en surface, l'étendue des déserts et les incendies de forêt. L'épaisseur et la composition des varves sont de la même manière liées aux variations annuelles ou saisonnières des précipitations, des débits des cours d'eau et des températures.

Les récifs coralliens des zones tropicales sont très sensibles aux changements climatiques. Leurs bandes de croissance sont fonction de la température de l'eau et de la saison au cours de laquelle elles se sont formées. L'analyse de ces bandes permet d'établir l'année ou la saison exacte à laquelle correspond telle valeur de la température de l'eau. Les données tirées des coraux servent à opérer une reconstitution estimative des variations passées du phénomène El Niño-oscillation australe (ENSO), de la chronologie des remontées d'eaux froides équatoriales et de l'évolution des tourbillons subtropicaux, des régimes des alizés et de la salinité de l'océan.

L'étude des cernes ou anneaux de croissance des arbres révèle une grande variabilité interannuelle et d'importantes différences spatiales. Il est possible d'établir une relation entre certaines des variations de ces cernes et les conditions météorologiques et climatiques à micro-échelle et à grande échelle; on peut considérer les plantes un peu comme des appareils intégrés de mesure pour l'environnement. Certaines espèces d'arbres ayant une durée de vie de plusieurs siècles, leurs anneaux annuels de croissance nous permettent de reconstituer sur une période de longue durée la chronologie de la variabilité du climat (en nous fournissant des indications bien antérieures aux mesures réalisées à l'aide d'instruments). Compte tenu de la relation étroite qu'il est possible d'établir entre le développement végétal et les conditions météorologiques et climatiques, les SMHN de nombreux pays exploitent des réseaux d'observation phénologique.

Le tableau ci-après propose un résumé des éléments climatiques les plus courants observés en surface et sous la surface selon divers types de réseaux et de stations.

Exemples d'éléments en surface et sous la surface pour différents réseaux de stations ou types de stations

Élément	Station climatologique ordinaire	Station climatologique principale	Station maritime	Station hydrométéorologique	Station agrométéorologique	Station en milieu urbain	Station de collecte de données indirectes
Température de l'air	•	•	•		•	•	
Température du sol					•		
Température de l'eau			•	•			
Précipitations	•	•	•	•	•	•	
Conditions météorologiques		•	•		•	•	
Nébulosité		•	•		•	•	
Pression		•	•		•	•	
Visibilité		•	•		•	•	
Humidité		•	•		•	•	
Vent		•	•		•	•	
Rayonnement solaire		•			•	•	
Ensoleillement		•			•	•	
Salinité			•				
Courants			•				
Niveau de la mer			•				
Vagues			•				
Quantité de mouvement air-mer			•				
Flux air-mer			•				
Glace			•	•			
Oxygène dissous			•				
Nutriments			•				
Bathymétrie			•				
Biomasse			•				
Écoulement fluvial				•			
Niveaux des cours d'eau				•			

<i>Élément</i>	<i>Station climatologique ordinaire</i>	<i>Station climatologique principale</i>	<i>Station maritime</i>	<i>Station hydrométéorologique</i>	<i>Station agrométéorologique</i>	<i>Station en milieu urbain</i>	<i>Station de collecte de données indirectes</i>
Écoulement de sédiments				•			
Recharge				•			
Évaporation				•	•	•	
Humidité du sol				•	•	•	
Ruisseaulement				•	•		
Eaux souterraines				•	•		
Développement végétal						•	•
Pollen							•
Composition des glaces et des sédiments							•
Anneaux de croissance des arbres							•
Anneaux de croissance des coraux							•
Substances chimiques dans l'atmosphère						•	
Matière particulaire						•	

2.2.2 Éléments en altitude

Les observations en altitude font partie intégrante du Système mondial d'observation. L'éventail des activités climatologiques nécessitant des observations en altitude comprend la surveillance et la détection de la variabilité et de l'évolution du climat, la prévision du climat à toutes les échelles de temps, la modélisation du climat, les études des processus climatiques, les activités de réanalyse des données et les études concernant les satellites, notamment l'étalonnage des extractions de données de satellite et le transfert radiatif.

La plus longue série chronologique de données d'observation en altitude a été obtenue au moyen d'instruments emportés par ballon, complétés par des dispositifs de poursuite au sol, le tout formant un réseau de radiosondage. Ces mesures par radiosondage constituent une base de données sur des variables atmosphériques qui remontent aux années 1930, même si la couverture est en général médiocre avant 1957. Les séries de données de radiosondage se caractérisent par de nombreuses interruptions et erreurs systématiques dues à des changements d'instruments et de procédures opérationnelles, ainsi que par un manque de métadonnées. Les observations par satellite existent depuis les années 1970, certaines ayant été regroupées et retraitées afin de constituer des séries chronologiques continues. Tout comme les séries de données de radiosondage, les séries de données de satellite présentent des défauts découlant de différents facteurs: résolution verticale limitée, dérive d'orbite, modifications de la plate-forme satellitaire, dérive des instruments, complications engendrées par les procédures d'étalonnage et erreurs systématiques découlant des modifications apportées aux algorithmes de traitement. Des mesures en altitude peuvent aussi être obtenues à partir d'autres plates-formes mobiles, tels les aéronefs. On estime que les observations réalisées en certains lieux situés en haute montagne font également partie du système de mesure en altitude.

Les principales exigences en matière d'observation dans le cas de la surveillance des changements en altitude sur une longue période sont les suivantes:

- a) Une série de données de longue durée (plusieurs décennies), stable et homogène dans le temps, pour qu'il soit possible de déterminer en toute confiance que les changements observés concernent bien l'atmosphère et ne sont pas induits par des modifications du système d'observation ou des artefacts des méthodes d'homogénéisation;
- b) Une bonne résolution verticale permettant de décrire la structure verticale des variations de la température, de la vapeur d'eau et de l'ozone, ainsi que des changements dans la tropopause;
- c) Une couverture et une résolution géographiques suffisantes, pour qu'il soit possible d'établir des tendances mondiales et régionales dignes de foi;
- d) Une précision dans les observations plus fine que la signature des variations atmosphériques prévues, pour qu'il soit possible de déterminer clairement aussi bien la variabilité que les changements à long terme. Cette exigence est particulièrement importante en ce qui concerne les observations de la vapeur d'eau dans la haute troposphère et la stratosphère.

Les éléments climatiques essentiels tirés des observations en altitude sont la température, la vapeur d'eau, la pression, la vitesse et la direction du vent, les propriétés des nuages, la luminance énergétique et le rayonnement (total résultant, descendant et ascendant), ainsi qu'il est indiqué dans les publications de l'OMM intitulées *Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC* (GCOS-82, WMO/TD-No. 1143) et *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (GCOS-92, WMO/TD-No. 1219). Il importe de bien connaître la structure verticale de la composition chimique de l'atmosphère globale, car cette composition présente un intérêt capital pour la prévision du climat, la surveillance de l'évolution du climat, la prévision de l'ozone et d'autres paramètres de la qualité de l'air ainsi que dans des domaines d'application tels que l'étude, notamment prospective, de la santé et du bien-être de la faune, de la flore et de l'être humain (voir le *Règlement technique*, Volume I, partie I, 6.3; le *Plan for the Global Climate Observing System* (GCOS-14, WMO/TD-No. 681); et le *GCOS/GTOS Plan for Terrestrial Climate-related*

Observations (GCOS-32, WMO/TD-No. 796)). Parmi les éléments de cette composition chimique qu'il y a lieu de mesurer à la fois dans l'atmosphère libre et près du sol figurent la concentration d'ozone et de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, etc.), le trouble atmosphérique (épaisseur optique des aérosols), la charge totale en aérosols et la concentration de gaz réactifs et de composés radioactifs. Il faut aussi mesurer les pluies acides (ou plus généralement la chimie des précipitations et des particules) et le rayonnement ultraviolet pour obtenir des informations détaillées sur la composition chimique de l'atmosphère (voir la publication intitulée *The Changing Atmosphere: An Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation Theme for the IGOS Partnership*. Rapport de la VAG N° 159 (WMO/TD-No. 1235)).

Les mesures en altitude devraient représenter tous les régimes climatiques et tous les types de surface. Les codes de transfert radiatif employés pour convertir les données brutes de la luminance énergétique obtenues par satellite en données sur les paramètres géophysiques se fondent sur des hypothèses relatives aux conditions de surface. Il y a donc lieu de disposer d'une représentation des conditions environnementales locales, tant à la surface des océans qu'à celle des terres émergées.

2.2.3 Éléments mesurés par télédétection

Les satellites et autres systèmes de télédétection, notamment les radars météorologiques, fournissent une multitude d'informations supplémentaires, en particulier dans les zones où les données sont rares. Cependant, ils ne peuvent pas encore fournir des données présentant la précision et l'homogénéité requises pour bon nombre des éléments que les stations au sol mesurent en surface,. Grâce à leur couverture spatiale, ils complètent les réseaux d'observation en surface, mais ne s'y substituent pas. Voici une liste d'éléments qu'il est possible de mesurer ou d'estimer grâce à la télédétection: précipitations (avec une précision limitée pour de petites superficies, aux interfaces océan-atmosphère, sur les hautes terres ou en cas d'orographie abrupte); nébulosité; flux radiatifs; bilan radiatif et albédo; biomasse dans les couches supérieures de l'océan, topographie de la surface des océans et hauteur des vagues; étendue des glaces de mer; température de la mer en surface; vecteurs vent et vitesse du vent à la surface de l'océan; profils de la température, de l'humidité et du vent dans l'atmosphère; composition chimique de l'atmosphère; enneigement; étendue des inlandsis et des glaciers; végétation et couverture du sol; et topographie des terres émergées.

La télédétection permet d'obtenir une meilleure couverture spatiale et temporelle que les observations *in situ*. Les données obtenues par télédétection complètent aussi les observations provenant d'autres plates-formes et se révèlent particulièrement utiles en cas d'absence ou d'altération de ces observations. Même si la télédétection présente un avantage certain, l'utilisation directe des données qu'elle procure pour les applications en climatologie pose des difficultés. Avant tout, les relevés portent sur des périodes relativement courtes, et il est donc impossible de tirer de ce type de données des conclusions concernant la variabilité et l'évolution du climat à long terme. Il est impossible aussi de comparer directement les données de télédétection avec les mesures effectuées *in situ*. À titre d'exemple, les estimations de la température de la pellicule superficielle de la Terre à l'aide d'observations par satellite diffèrent des mesures de la température effectuées sous abris normalisés, et la relation entre les mesures de la réflectivité radar et les hauteurs de précipitation indiquées par les pluviomètres peut se révéler complexe à établir. Il est néanmoins possible de produire des séries de données homogènes qui combinent les mesures par télédétection et les observations *in situ*.

2.3 INSTRUMENTS

Les stations climatologiques qui font partie d'un réseau national devraient être équipées d'instruments normalisés et approuvés; il peut incomber aux SMHN de fournir ces instruments. Quand les instruments proviennent d'autres organismes ou qu'ils sont achetés par l'observateur, il appartient alors à un bureau climatologique de veiller avec soin à ce qu'ils soient conformes aux normes nationales.

La présente section donne des indications sur certains instruments de mesure en surface de base et sur le choix des instruments. Plusieurs autres publications de l'OMM constituent des compléments indispensables de ce guide; il convient de les conserver à portée de main pour pouvoir les consulter en cas de besoin. Ainsi le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8) dresse un inventaire détaillé des instruments à utiliser pour mesurer les éléments relatifs au climat ou autres dans les stations terrestres et maritimes. Le *Guide des pratiques de météorologie agricole* (OMM-N° 134) fournit des précisions sur les instruments qu'il faut utiliser pour mesurer les éléments agrométéorologiques et le *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM-N° 168), sur ceux utilisés à des fins hydrologiques.

Pour sélectionner ces instruments, y compris les systèmes de traitement et de transmission des données connexes, il convient de respecter les dix principes relatifs à la surveillance du climat (voir 2.1), tout en tenant compte des points suivants:

- Fiabilité;
- Capacité d'adaptation à l'environnement opérationnel de la station;
- Degré d'exactitude;
- Simplicité de conception;
- Raisons qui motivent les observations.

On estime qu'un instrument est fiable lorsqu'il fonctionne en permanence suivant ses spécifications techniques. Un manque de fiabilité donne lieu à des données manquantes, des erreurs systématiques et d'autres hétérogénéités. Les instruments fiables doivent être suffisamment solides pour résister à tous les phénomènes météorologiques et physiques extrêmes qui peuvent se produire à l'emplacement de la station et, le cas échéant, à toute manipulation dans le cas d'observations manuelles.

Il faut choisir un instrument conçu pour le climat du lieu où il sera installé et aussi qui soit compatible avec les appareils avec lesquels il doit fonctionner. À titre d'exemple, un capteur anémométrique installé dans une région au climat froid doit pouvoir résister au givrage, tandis qu'un autre situé dans une zone désertique devra être protégé contre toute intrusion de poussière. Les capteurs d'une station météorologique automatique doivent fournir un signal de sortie qui puisse être traité automatiquement. Ainsi, le thermomètre à mercure standard qu'on utilise pour prendre des mesures à la main dans les stations dotées de personnel, par exemple, doit être remplacé par une sonde thermique, tel un thermocouple, dont la réaction peut être convertie en un signal électrique. Les instruments doivent aussi être installés de façon qu'on puisse y accéder à des fins d'entretien.

En principe, on devrait choisir des instruments qui présentent un degré d'exactitude et de précision suffisamment élevé pour répondre aux besoins climatologiques. Il importe aussi de veiller à ce que l'instrument puisse continuer de fournir le degré d'exactitude exigé sur une longue période, car les dérives instrumentales peuvent causer de graves problèmes d'hétérogénéité dans les séries de données climatologiques. Sans fiabilité, l'exactitude perd de son utilité.

Plus un instrument est simple, plus il est facile de le faire fonctionner, d'assurer son entretien et de surveiller ses performances. Il est parfois nécessaire d'installer des capteurs redondants (par exemple, une triple thermistance dans les stations d'enregistrement de données automatique) pour en vérifier correctement la performance et la fiabilité dans le temps. Les systèmes complexes tendent plus facilement à causer des problèmes d'hétérogénéité dans les données, de données manquantes, de coûts élevés de maintenance et de variation d'exactitude.

Les exigences en matière de mesure sont en général dictées par l'objet de l'observation. Le type et les caractéristiques de l'instrument ou encore le type d'installation du capteur sont des facteurs dont il faut bien tenir compte pour veiller à ce que ces exigences puissent être satisfaites.

Le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8) fournit des informations détaillées sur ces questions, notamment en ce qui concerne les normes et les pratiques recommandées en matière d'instruments et de mesures.

2.3.1 Équipement de base en surface

Plusieurs options peuvent se présenter pour obtenir des observations sur le climat à partir d'une station en surface. Il est possible par exemple d'équiper une station soit d'instruments de base, soit d'instruments enregistreurs ou automatisés en prévision des périodes où le personnel serait absent, soit de capteurs entièrement automatiques. Pour faire un choix, il importe de prendre en compte les dépenses de personnel, les frais de maintenance et le coût de remplacement du matériel. Il est souvent possible de négocier les prix avec les fabricants en invoquant, par exemple, les quantités sur lesquelles porte l'achat.

Quand cela est possible, il est bon qu'une personne habitant à proximité, dûment formée, remplisse la fonction de gardien du site d'observation. Il appartient à ce gardien d'examiner le site régulièrement, c'est-à-dire d'assurer l'entretien du terrain (notamment couper l'herbe), d'assurer aussi l'entretien de base des instruments (notamment un simple nettoyage), de vérifier si ceux-ci ne sont pas endommagés et de s'assurer que personne ne s'est introduit sur le site. Dans les stations terrestres dotées de personnel et faciles d'accès, cette inspection devrait être au moins hebdomadaire. L'inspection de sites isolés devrait être effectuée aussi souvent que possible. Il faut aussi disposer de personnel prêt à intervenir rapidement en cas de panne des systèmes essentiels.

Il existe des appareils capables d'enregistrer les variations de bon nombre d'éléments climatiques, notamment la température, l'humidité, le vent et l'intensité des précipitations. Il faut ensuite transférer les données enregistrées dans des tableaux ou sous forme numérique. Il appartient aux observateurs de s'assurer que ces appareils fonctionnent normalement et que les données enregistrées, par exemple sur des diagrammes, sont claires et faciles à lire. Il leur appartient aussi de vérifier et d'évaluer régulièrement les données enregistrées (en les comparant aux valeurs relevées par lecture directe des instruments) et d'exécuter un marquage chronométrique à intervalles fréquents bien définis. Ces données enregistrées peuvent servir notamment à remplacer les données manquantes lorsqu'un observateur, absent de la station pour cause de maladie par exemple, n'a pas pu réaliser les observations directement. Le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8) fournit des indications précises sur la maintenance et le fonctionnement des instruments enregistreurs, de leurs tambours et de leurs mouvements d'horlogerie.

Les données fournies par les stations météorologiques automatiques (SMA), où les instruments enregistrent et transmettent des observations automatiquement, se limitent en général à celles qu'il est possible d'obtenir facilement sous forme numérique, bien que l'éventail des capteurs automatiques, déjà important, ne cesse de s'élargir. Les stations automatiques servent à compléter les stations dotées de personnel et à augmenter la densité des réseaux, la fréquence des mesures et la quantité des éléments mesurés, en particulier dans les régions isolées ou inhabitées d'accès difficile. Le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8) mentionne certaines des exigences en matière de sensibilité et d'exactitude qui s'appliquent à ces stations automatiques; de nouvelles exigences sont définies, en particulier pour l'étude de la variabilité du climat.

Grâce aux SMA, de nombreux pays ont réussi à réduire leurs dépenses d'exploitation. Les SMHN qui ont à choisir, pour leurs programmes d'observation, entre des SMA et des stations dotées de personnel doivent examiner plusieurs points. Si les SMA offrent la possibilité très intéressante de fournir des données suivant une fréquence particulièrement élevée ou encore des données supplémentaires provenant de lieux isolés, leur fonctionnement entraîne cependant une série de dépenses importantes, qui englobent le coût de la main d'œuvre chargée d'assurer la maintenance et de veiller à la fiabilité des SMA, la nécessité d'avoir accès à ce type de main d'œuvre, l'accessibilité du lieu pour les besoins de l'installation et de la maintenance, la proximité d'une source d'énergie adéquate, la sécurité du site et l'existence d'une infrastructure de communication. Il importe de bien prendre en compte tous ces facteurs au regard des avantages

attendus, comme la densification ou l'élargissement du réseau. Les SMA peuvent présenter un réel intérêt par rapport à des programmes d'observation fondés sur des stations dotées de personnel, voire constituer la seule solution possible, mais elles exigent un engagement fort de la part de l'organisme chargé de les exploiter.

Les instruments maritimes comprennent les bouées ancrées et dérivantes servant à la collecte de données, les flotteurs des glaces et les flotteurs profonds (tels que les flotteurs Argo). Les données sont recueillies à distance, mais les instruments effectuent en général les mesures *in situ*. Il s'agit de dispositifs relativement économiques permettant d'obtenir des données météorologiques et océanographiques en provenance de zones océaniques reculées. Ces instruments constituent ainsi une composante essentielle des systèmes d'observation du milieu marin et des programmes opérationnels et de recherche à vocation météorologique et océanographique. Par exemple, le réseau de bouées ancrées pour l'observation océan-atmosphère dans les mers tropicales a permis de recueillir sans délai des données océanographiques et météorologiques en surface de grande qualité dans l'ensemble de la zone équatoriale du Pacifique pour les besoins de la surveillance, de la prévision et de la connaissance des oscillations climatiques associées aux anomalies El Niño et La Niña.

2.3.2 Instruments de mesure en altitude

La plupart des données climatologiques en altitude sont déduites généralement des mesures réalisées, pour la prévision synoptique, à l'aide de radiosondes emportées par ballon. Des techniques et des instruments divers sont employés pour mesurer la pression, la température, l'humidité et le vent et pour transformer les signaux de sortie en quantités météorologiques. Il importe que tous les SMHN distribuent des manuels d'instruction pour chaque type de station d'observation en altitude, afin que le matériel soit correctement utilisé et les données convenablement interprétées. Selon le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), toute modification apportée aux systèmes de radiosondage ou de mesure du vent utilisés dans une station à des fins d'exploitation doit être signalée rapidement au Secrétariat de l'OMM.

La qualité des mesures effectuées par les radiosondes pose plusieurs problèmes pour la surveillance du climat et la détection des changements climatiques. Des incertitudes pèsent sur les données de température en raison des erreurs dues au rayonnement. À basse température, les radiosondes standard ne peuvent pas mesurer la vapeur d'eau avec un degré d'exactitude suffisant. Les types de capteurs utilisés, en particulier pour mesurer l'humidité, ont évolué avec le temps. La couverture spatiale des observations par radiosondage n'est pas uniforme; la plupart des stations se situent sur les terres émergées de l'hémisphère Nord, alors que les réseaux mis en place dans l'hémisphère Sud et sur les océans sont bien moins denses. Les séries chronologiques établies à partir des observations par radiosondage donnent lieu à des problèmes innombrables dus à un manque de comparaisons entre les différents types de radiosondes et de capteurs et aux différences d'exposition; il est indispensable de disposer de métadonnées concernant les instruments et les procédures de réduction et de traitement des données si l'on veut utiliser les données de radiosondage en climatologie appliquée. De nouvelles radiosondes de référence sont mises au point pour atténuer les défauts des radiosondes standard employées actuellement. Un réseau restreint de ces nouvelles radiosondes sera mis en place pour étalonner et valider diverses observations par satellite de la température et de la vapeur d'eau.

Un système d'observation en altitude peut évoluer avec le temps, en fonction des progrès technologiques. Il est donc essentiel, dans un réseau, de prévoir une période suffisamment longue pendant laquelle l'ancien système et le nouveau système fonctionneront en parallèle, ce qui permettra d'assurer la continuité des données et de comparer de façon probante les degrés d'exactitude et de précision des deux systèmes. Il y a lieu d'étalonner régulièrement les systèmes de mesure sur site. Les stratégies de remplacement d'instruments doivent impérativement tenir compte des changements qui interviennent dans d'autres réseaux, tels que l'utilisation des satellites. Il convient de se fonder sur les principes relatifs à la surveillance du climat (voir 2.1) pour orienter la mise au point et le fonctionnement d'un système d'observation en altitude.

2.3.3 Télédétection à partir de la surface

Pour les besoins de la télédétection, on utilise des capteurs soit actifs soit passifs. Les systèmes à capteurs actifs émettent une certaine forme de rayonnement qui est diffusé par diverses cibles, les capteurs analysant ensuite le signal rétrodiffusé. Les capteurs passifs mesurent le rayonnement émis (ou modifié) par l'environnement.

La technique de télédétection active à partir du sol la plus commune est le radar météorologique. Une antenne concentre en un faisceau étroit l'énergie hyperfréquence de forte puissance émise sous la forme d'une courte impulsion. Les précipitations réfléchissent le faisceau, et le rayonnement rétrodiffusé est en général reçu par le même système d'antenne. Le lieu où se produisent les précipitations peut être déterminé en fonction de l'azimut et de l'angle d'inclinaison de l'antenne, compte tenu du temps écoulé entre l'émission et la réception de l'énergie réfléchie. L'intensité du rayonnement reçu est fonction de la nature des précipitations, le signal pouvant être traité pour estimer l'intensité des précipitations. Les conditions atmosphériques et environnementales peuvent nuire à la qualité des données radar, aussi faut-il faire preuve de prudence lorsqu'il s'agit d'interpréter l'information. Parmi les effets indésirables, citons les signaux réfléchis par le relief, les immeubles ou d'autres cibles non météorologiques; l'atténuation du signal radar quand les échos météorologiques traversent des zones de précipitations intenses; les inversions de température dans les basses couches de l'atmosphère qui infléchissent le faisceau radar de telle façon que des échos de sol sont observés à des endroits inattendus; ou encore l'effet de bande brillante, qui correspond à une couche de réflectivité accrue par suite de la fonte des cristaux de glace au passage du niveau de fusion dans l'atmosphère, ce qui peut entraîner une surestimation des précipitations. En raison des problèmes liés aux capacités d'accès et de traitement, des incertitudes concernant l'étalonnage et les modifications des méthodes d'étalonnage et de la relation complexe entre la réflectivité et les précipitations, on se sert relativement peu des données radar dans les études climatologiques.

Les profileurs de vent font appel au radar pour dresser des profils verticaux de la vitesse et de la direction du vent horizontal depuis une altitude proche de la surface jusqu'à la tropopause. Le mélange turbulent de l'air causé par les différences de température et de teneur en humidité provoque des fluctuations de la densité atmosphérique. Les variations de l'indice de réfraction qui en résultent sont utilisées comme traceur du vent moyen. Bien qu'ils donnent de meilleurs résultats en air clair, les profileurs de vent peuvent fonctionner en présence de nuages et de précipitations modérées. Quand ils sont équipés d'un système de sondage radioacoustique, ils peuvent en outre mesurer la température et en fournir des profils verticaux. Dans l'atmosphère, la vitesse du son varie en fonction de la température. On suit donc l'évolution de l'énergie acoustique à travers l'atmosphère et l'on en déduit le profil estimé de la température à partir de la vitesse de propagation des ondes acoustiques.

La détection de la foudre constitue le mode d'utilisation le plus commun de la télédétection passive à partir de la surface. Les capteurs de foudre balayent une bande de fréquences électromagnétiques pour détecter les décharges électriques à l'intérieur des nuages, entre les nuages ou entre les nuages et le sol. Les caractéristiques des éclairs sont déduites de celles du rayonnement reçu (amplitude, temps d'arrivée, direction de la source, polarité et autres caractéristiques de la forme de l'onde, etc.). Un seul capteur ne suffit pas à déterminer avec précision la position des décharges électriques; il faut pour cela réunir les données provenant de plusieurs capteurs pour les traiter à l'aide d'un processeur central. Le processeur analyse et combine les données des différents capteurs pour calculer la position et les caractéristiques des éclairs observés. L'exactitude et l'efficacité d'un réseau de détecteurs de foudre diminuent progressivement en périphérie du réseau. La distance à laquelle il est possible de détecter l'onde correspondant à la foudre est fonction de la bande de fréquences employée, de l'amplitude de la décharge et de la configuration du réseau. Quand un éclair se produit trop loin du réseau, il ne peut plus être détecté.

2.3.4 Télédétection à partir d'aéronefs et de l'espace

De nombreux longs courriers sont équipés de systèmes automatiques d'enregistrement qui, en phase de croisière, transmettent régulièrement des données sur la température et le vent, et

dans certains cas sur l'humidité. Certains aéronefs enregistrent et transmettent des observations fréquentes en phase de montée et de descente, ce qui complète de façon importante les données normales de radiosondage, au moins dans la troposphère. Ces données d'observation sont prises en compte dans les systèmes opérationnels d'analyse météorologique et, grâce à des programmes de réanalyse, apportent ainsi une contribution importante aux séries de données sur le climat.

Les systèmes de retransmission des données météorologiques d'aéronefs fonctionnent à bord d'aéronefs équipés de systèmes de navigation et d'autres systèmes de télédétection. Ce sont des capteurs qui mesurent la vitesse anémométrique, la température de l'air et la pression atmosphérique. Le système de navigation fournit d'autres données relatives à la position, à l'accélération et à la direction de l'aéronef. Les calculateurs de bord qui assurent la gestion du vol et servent aux systèmes de navigation calculent en permanence les données de navigation et les données météorologiques et les communiquent à l'équipage. Les données sont entrées automatiquement dans le système de communication de l'aéronef, qui les transmet au sol. Dans certains cas, un dispositif de traitement spécifique embarqué permet d'accéder aux données brutes émanant des systèmes de l'aéronef et d'en dériver indépendamment les variables météorologiques. Dans les messages transmis aux stations au sol figurent habituellement la vitesse et la direction du vent horizontal, la température de l'air, l'altitude (par rapport à une surface isobare de référence), une mesure de la turbulence, l'heure de l'observation, la phase du vol et la position de l'aéronef. Ces données sont utilisées par les contrôleurs aériens pour assurer la bonne sécurité du vol et par les prévisionnistes.

Il existe un grand nombre de sources d'erreurs susceptibles d'accroître l'incertitude des mesures réalisées par les aéronefs. 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 anémométrique, pour un appareil donné et entre divers types d'appareils, modifie les distances d'échantillonnage et fait fluctuer les longueurs d'onde filtrées. Bien qu'elles ne présentent pas un degré de précision et d'exactitude aussi bon que la plupart de celles issues de systèmes d'observation au sol, les données d'aéronefs peuvent fournir un complément d'information utile pour les bases de données météorologiques.

Les données de satellite viennent compléter de façon utile les bases de données climatologiques en raison de leur vaste couverture géographique, en particulier au-dessus de régions où les données sont rares, voire complètement absentes. Les satellites présentent un grand intérêt lorsqu'il s'agit de surveiller des phénomènes tels que l'étendue des glaces de mer aux pôles, l'enneigement, l'activité glaciaire, l'évolution du niveau de la mer, le couvert végétal et la teneur en humidité, ainsi que l'activité cyclonique. Ils contribuent aussi à l'amélioration des analyses synoptiques, une composante importante de la climatologie synoptique.

Les techniques de télédétection utilisent les propriétés d'émission, d'absorption et de diffusion de l'atmosphère et de la surface du globe. L'équation physique du transfert radiatif fournit des renseignements sur les propriétés radiatives de l'atmosphère et de la surface terrestre, et sa solution inverse en fournit également au sujet de propriétés géophysiques telles que les profils de la température et de l'humidité, la température de la pellicule superficielle et les propriétés des nuages.

On trouvera des chiffres et des spécifications concernant les plates-formes et les capteurs satellitaires dans la publication intitulée *Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (SAT-22, WMO/TD-No. 992). On trouvera en outre des indications sur les éléments observés et sur l'exactitude et la résolution spatiale et temporelle des données recueillies par satellite dans les publications suivantes: *Report of the Capacity-building Training Workshop on Reducing the Impacts of Climate Extremes on Health* (WCASP-No. 59, WMO/TD-No. 1162), chapitre 1; *Guideline for the Generation of Satellite-based Datasets and Products Meeting GCOS Requirements* (GCOS-128, WMO/TD-No. 1488), section 4; WMO/TD-No. 992 (publication mentionnée ci-dessus), section 3.1 et annexe A.

Le document intitulé *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate* (GCOS-107, WMO/TD-No. 1338) contient des informations sur l'historique et l'évolution future des plates-formes et des capteurs satellitaires. La technologie de la télédétection progressant à grands pas, il arrive que les plans d'exploitation des plates-formes et des capteurs subissent des modifications. Il faut donc se reporter aux documents les plus récents lorsqu'on utilise des données issues de la télédétection. Le Comité sur les satellites d'observation de la Terre publie des rapports, mis en ligne sur l'Internet, qui fournissent des renseignements à jour à propos des satellites.

Comme dans le cas de la télédétection à partir de la surface, il est possible de classer les capteurs satellitaires et autres capteurs embarqués en deux groupes: les capteurs passifs et les capteurs actifs. Les capteurs passifs comprennent les imageurs, les radiomètres et les sondeurs et mesurent le rayonnement émis par l'atmosphère ou la surface du globe. Les mesures qu'ils effectuent sont converties en informations géophysiques: profils verticaux de la vapeur d'eau, de la température et de l'ozone; renseignements sur les nuages; valeurs de la température de surface de l'océan et des terres émergées; couleur de l'océan et des terres émergées; etc. La longueur d'onde à laquelle fonctionne un capteur influe sur le type d'information recueillie, chacune des longueurs d'onde présentant des avantages et des inconvénients particuliers.

Les capteurs actifs comprennent les radars, les diffusiomètres et les lidars. Ils mesurent le signal rétrodiffusé par la cible soumise à un rayonnement émis depuis la plate-forme. Ils présentent l'avantage de fournir des données précises sur la distance de la cible en mesurant le temps écoulé entre le signal émis et son retour. Ils fournissent aussi des renseignements sur la position de la cible en utilisant un faisceau directionnel fortement concentré. Les signaux rétrodiffusés peuvent être convertis pour fournir des données sur la vitesse et la direction du vent, la hauteur dynamique de l'océan et le spectre des vagues, le vecteur rotationnel de la tension du vent océanique et l'écoulement géostrophique, les propriétés des nuages et l'intensité des précipitations ainsi que des données pour les inventaires des étendues de glace.

Il arrive que des informations utiles soient tirées de données de satellite qui ne sont pas destinées initialement à l'étude du climat. À titre d'exemple, le Système de positionnement global exploite une constellation comptant une douzaine de satellites pour assurer un service de navigation. Mais en mesurant le temps de propagation des signaux utilisés par ce système, il est possible de déterminer la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau.

Les satellites opérationnels d'observation de l'environnement se situent sur deux types d'orbites complémentaires: géostationnaire et polaire. Un satellite en orbite géostationnaire se trouve à une altitude d'environ 36 000 km au-dessus de l'équateur, ce qui lui permet de tourner à la même vitesse et dans le même sens que la Terre. Il reste ainsi toujours au-dessus du même point de la surface du globe. Il est ainsi doté d'une capacité de surveillance permanente, permettant de suivre l'évolution de certaines caractéristiques atmosphériques et d'en tirer des données sur le vent. Les satellites en orbite polaire dite basse, également appelés satellites à défilement, se déplacent généralement à une altitude d'environ 800 km, dans une direction presque nord-sud par rapport à la Terre. Les instruments dont les satellites opérationnels à défilement sont équipés permettent d'observer la majeure partie du globe deux fois par jour à un intervalle de 12 heures environ. Certes, le fait de n'assurer que deux passages quotidiens constitue un inconvénient par rapport aux satellites géostationnaires, mais en contrepartie, les instruments embarqués dans les satellites à défilement sont plus variés et disposent d'une meilleure résolution spatiale, et les latitudes élevées sont bien mieux observées.

Les climatologues doivent être conscients de la nécessité de garantir une bonne gestion scientifique des données, qu'il s'agisse des données brutes que fournissent les mesures par télédétection ou des données traitées à des fins climatologiques. En plus des dix principes énumérés dans la section 2.1, les systèmes de satellites devraient aussi respecter les principes suivants:

1. Maintenir un échantillonnage constant tout au long du cycle diurne (en réduisant au minimum les effets du déclin et de la dérive d'orbite);

2. Prévoir une période suffisante d'exploitation en parallèle pour déterminer les écarts de mesure entre satellites;
3. Assurer la continuité des mesures de satellite (en comblant les lacunes des relevés de longue durée) au moyen de stratégies de lancement et de mise en orbite bien adaptées;
4. Étalonner systématiquement les instruments – en particulier pour ce qui concerne la confirmation de la luminance énergétique à l'aide d'une échelle internationale de luminance fournie par un institut national de métrologie – et décrire en détail leurs caractéristiques avant leur mise sur orbite;
5. Prévoir un étalonnage à bord adapté aux observations du système climatique ainsi que des moyens de contrôle des caractéristiques des instruments embarqués;
6. Assurer la production opérationnelle des produits climatologiques essentiels et faire en sorte que des spécialistes puissent procéder, s'il y a lieu, à l'examen des nouveaux produits;
7. Mettre en place et maintenir en service des systèmes de données susceptibles de faciliter l'accès des utilisateurs aux produits climatologiques, aux métadonnées et aux données brutes – y compris les données essentielles destinées aux analyses en différé;
8. Maintenir en service le plus longtemps possible des instruments de base en état de marche qui satisfont aux exigences en matière d'étalonnage et de stabilité précisées ci-dessus, même si ces instruments se trouvent sur des satellites mis hors service;
9. Veiller à compléter les mesures de satellite par des observations de référence *in situ* en ayant recours à la coopération et à des activités pertinentes;
10. S'agissant des observations satellitaires et des produits dérivés, déterminer les erreurs aléatoires et les écarts de mesure dépendant du temps.

Le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544) donne des orientations à propos des diverses composantes des systèmes d'observation.

2.3.5 Étalonnage des instruments

Pour pouvoir déterminer les variations spatiales et temporelles du climat, il est primordial d'établir le degré relatif d'exactitude des différents capteurs utilisés à un moment donné dans un réseau et de le vérifier périodiquement. De même, il faut veiller à établir la relation entre les performances des capteurs et des systèmes de remplacement et celles des instruments remplacés. Dans le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), il est indiqué que toutes les stations doivent être équipées d'instruments convenablement étalonnés. On trouvera des informations détaillées sur les techniques d'étalonnage dans le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8). Pour les besoins de la climatologie, il ne suffit pas en général de se satisfaire des étalonnages réalisés par les fabricants, et il est faux de penser qu'après un étalonnage, il ne se produira pas de dérive ou qu'il n'y aura pas d'évolution dans le temps.

Il y a lieu de procéder, à l'aide d'instruments étalons portatifs, à une comparaison des mesures effectuées par les instruments ou les systèmes de mesure à l'occasion du remplacement des instruments et à chaque inspection régulière de la station (voir 2.6.6). Les étalons voyageurs, qu'il faut vérifier par comparaison aux étalons de référence nationaux avant et après chaque déplacement, doivent être suffisamment robustes pour résister au transport et aux changements en matière d'étalonnage. Il faut veiller à bien noter les modifications concernant les instruments et les dérives par rapport aux étalonnages et à communiquer ces informations qui constituent des métadonnées indispensables à l'évaluation des variations vraies du climat (voir 2.6.9).

Lors des inspections des SMA installées dans des zones reculées, il convient de réaliser des observations à l'aide des étalons de voyage, qu'on pourra ensuite comparer aux signaux de

sortie enregistrés par les SMA et transmis au centre chargé de rassembler les données. Dans certains SMHN, on dispose de procédures de détection automatique des erreurs et des dérives instrumentales, selon lesquelles les valeurs mesurées sont comparées à celles recueillies par un réseau et à des valeurs analysées à partir de champs lissés numériquement. Ces procédures automatiques sont utiles, car elles permettent de détecter non seulement les dérives, mais aussi les fortes variations anormales.

Certains SMHN exploitent leurs propres dispositifs d'étalonnage ou font appel pour cela à des entreprises d'étalonnage agréées. Les installations régionales d'étalonnage relevant de l'OMM sont chargées de conserver les étalons et de les étalonner, de certifier la conformité des instruments par rapport aux étalons, d'organiser des évaluations d'instruments et de fournir des conseils en ce qui concerne les performances des instruments.

La publication intitulée *GCOS Plan for Space-based Observations* fournit des informations détaillées sur l'étalonnage des capteurs utilisés pour la télédétection à partir de l'espace, sur les chevauchements de relevés à des fins d'interétalonnage et sur les exigences en matière de métadonnées. Le Système mondial d'interétalonnage des instruments satellitaires prévoit de comparer les valeurs de la luminance énergétique mesurée simultanément par des paires de satellites aux points d'intersection de leurs traces au sol, en particulier dans les situations où les trajectoires d'un satellite à défilement et d'un satellite géostationnaire se croisent. Ce type d'interétalonnage garantira un étalonnage cohérent au niveau mondial sur le plan opérationnel.

L'étalonnage des radars météorologiques nécessite la mesure des caractéristiques du système considéré, notamment la fréquence émise et la puissance d'émission, le gain d'antenne, les largeurs de faisceau, le niveau de sortie du récepteur et les pertes dues au filtrage. Le contrôle des performances permet de maintenir d'autres caractéristiques du système dans des limites acceptables, notamment l'orientation de l'antenne, les lobes latéraux, la durée et la forme des impulsions, les diagrammes de faisceau et le niveau de bruit du récepteur.

L'analyse régulière des données (par exemple, le contrôle par recouplement du comportement des capteurs et l'analyse des paramètres des décharges) devrait permettre de détecter les dérives dont peuvent faire l'objet les capteurs de détection de la foudre ou les paramètres du processeur central de traitement des données sur les éclairs. Il convient aussi de procéder à des comparaisons avec d'autres observations de l'activité des éclairs, notamment les observations manuelles consistant à «entendre le tonnerre» ou à «voir des éclairs», ou encore les observations de cumulonimbus. Comme pour les radars météorologiques, le contrôle et l'étalonnage des caractéristiques du système devraient être réalisés régulièrement.

2.4 EMPLACEMENT DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES

Les critères précis d'exposition des instruments équipant spécialement les stations climatologiques, établis pour obtenir un degré d'exactitude optimal dans les mesures, sont examinés dans le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), partie III, dans le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8) et dans la publication intitulée *Representativeness, Data Gaps and Uncertainties in Climate Observations* (WMO/TD-No. 977). Ces publications sont des compléments indispensables du présent guide.

La représentativité et l'homogénéité des relevés climatologiques sont étroitement liées à l'emplacement de la station d'observation. Une station située sur un versant, sur une crête, sur une falaise ou dans une cuvette, ou à proximité d'un relief, d'un immeuble, d'un mur ou de tout autre obstacle fournira des données qui seront plus représentatives du lieu même que de la contrée plus vaste qui l'entoure. Quand une station subit ou sera amenée à subir les effets de la croissance de la végétation, y compris la croissance limitée d'arbres situés près du capteur ou la croissance de cultures de grande taille ou de bois à proximité, de la construction d'immeubles sur des terrains adjacents ou d'une intensification (ou d'une diminution) de la circulation routière ou aérienne (y compris par suite de changements touchant l'utilisation de pistes ou de voies d'accès), les données fournies ne seront ni largement représentatives ni homogènes.

Une station d'observation climatologique devrait se situer en un lieu favorisant l'exposition appropriée des instruments et offrant la plus large vue possible du ciel et du paysage environnant s'il faut y effectuer des observations visuelles. Les stations climatologiques ordinaires et principales devraient être situées sur un terrain plat, couvert d'herbe rase; il ne devrait pas y avoir d'arbres, d'immeubles, de murs ou de pentes raides à proximité, et l'emplacement ne devrait pas se trouver au fond d'une cuvette. Pour installer les instruments extérieurs de mesure de la température et de l'humidité, il suffit d'un enclos d'une superficie de neuf mètres sur six. L'idéal est de disposer dans cet enclos d'un carré de deux mètres de côté de sol dénudé pour les observations de l'état et de la température du sol. Une superficie légèrement plus grande (dix mètres sur sept) sera préférable si la station comprend aussi un pluviomètre.

À ce sujet, de nombreux SMHN appliquent une règle selon laquelle la distance entre un obstacle (y compris la clôture) et le pluviomètre doit être supérieure à deux fois, et de préférence quatre fois, la hauteur de l'obstacle au-dessus du pluviomètre. D'une façon générale, l'anémomètre devrait être placé à une distance correspondant à au moins dix fois, mais de préférence vingt fois, la hauteur d'un quelconque obstacle. Compte tenu des différents critères d'exposition propres aux divers instruments, il peut s'avérer nécessaire de séparer le site en deux. Certains éléments sont alors mesurés en un point donné et d'autres en un autre point situé à proximité, l'ensemble des données étant regroupées sous l'indicatif d'une seule et même station.

Il est impératif de protéger le site des visiteurs non autorisés, ce qui peut nécessiter l'installation d'une clôture. Il importe cependant que de telles mesures de sécurité ne nuisent pas à l'exposition des instruments. En règle générale, les stations automatiques exigent un degré élevé de sécurité, afin de bénéficier d'une protection contre les animaux et contre l'intrusion de toute personne non autorisée; elles nécessitent également une alimentation électrique adéquate et sûre, et parfois aussi une protection supplémentaire contre les inondations, les débris de feuilles ou le sable soulevé par le vent.

Les stations climatologiques ordinaires et principales devraient être installées sur de tels emplacements et faire l'objet de conditions administratives qui leur permettent de fonctionner de manière continue, avec une exposition demeurant inchangée, pendant au moins une décennie. Dans le cas des stations utilisées ou créées pour déceler les changements climatiques à long terme, notamment les stations climatologiques de référence et autres stations de référence du réseau du SMOC, le critère de constance de l'exposition et du fonctionnement doit être respecté sur plusieurs décennies.

Les sites et les instruments d'observation devraient être entretenus correctement de manière que la qualité des observations ne se dégrade pas sensiblement entre deux inspections de la station. Le programme d'entretien ordinaire préventif comprend le «ménage» périodique des sites et du matériel (fauchage de l'herbe et nettoyage des parties non protégées des instruments, y compris les abris météorologiques, par exemple) et les vérifications auxquelles les fabricants recommandent de soumettre les instruments. Il faudrait prévoir de fréquents contrôles de la qualité à la station ou dans un centre approprié, afin de déceler le plus tôt possible les défaillances de l'équipement. Selon la nature de la défaillance et le type de station, l'équipement devrait être remplacé ou réparé conformément à l'ordre de priorité établi et dans des délais convenus. Il importe tout particulièrement de tenir un journal des défaillances et des dispositions prises pour y remédier lorsque les données servent à des fins climatologiques. Ce journal sert de source principale de métadonnées concernant la station et fera donc partie intégrante des relevés climatologiques. Des indications détaillées sur l'entretien des stations figurent dans le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8, 1.2.5.2).

Des contraintes supplémentaires s'appliquent aux stations de la VAG mises en place pour fournir des données sur la composition chimique de l'atmosphère, comme cela est indiqué dans le *Règlement technique* (OMM-N° 49, Volume I, partie I, 6.1). Ces contraintes portent notamment sur les points suivants: les pratiques d'utilisation des sols ne doivent pas subir de modification notable dans un rayon de 50 km autour de l'emplacement de la station, et l'endroit doit être à l'abri des effets de la pollution locale et régionale provenant par exemple des grands centres de population, des activités industrielles et des pratiques agricoles extensives, des voies à grande

circulation, de l'activité volcanique et des incendies de forêt. Les stations mondiales et régionales de la VAG devraient se situer à moins de 70 km d'une station synoptique d'observation en altitude.

Compte tenu de la nature des environnements urbains, il est impossible de se conformer aux indications ordinaires pour le choix de l'emplacement d'une station et l'exposition des instruments qui s'avèrent nécessaires pour établir un relevé homogène qui puisse servir à décrire le climat à plus grande échelle. Les stations en milieu urbain présentent néanmoins un intérêt réel, puisqu'elles permettent de suivre l'évolution réelle du climat à l'échelon local, ce qui peut être vraiment utile pour un large éventail d'applications. La publication intitulée *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (WMO/TD-No. 1250) propose des directives s'appliquant au choix de l'emplacement des stations en milieu urbain, à l'installation de l'équipement et à l'interprétation des observations. À cet égard, il est indispensable de bien comprendre quel est le but des observations réalisées et d'obtenir des mesures qui soient représentatives du milieu urbain. Dans bon nombre de cas, il sera possible de respecter les pratiques normalisées, mais il peut se révéler nécessaire de disposer d'une certaine latitude quand il s'agit d'installer une station et des instruments en milieu urbain. Les caractéristiques propres à ce type d'installation montrent combien il importe de consigner des métadonnées qui décrivent avec précision la configuration de la station et des instruments.

2.5 CONCEPTION DES RÉSEAUX CLIMATOLOGIQUES

Un réseau de stations est formé de plusieurs stations du même type (par exemple un ensemble de stations de mesure des précipitations, de stations de mesure du rayonnement ou de stations climatologiques) administrées en groupe. Il convient d'optimiser chaque réseau pour qu'il puisse fournir les données attendues et fonctionner comme prévu à un coût acceptable. La plupart des méthodes d'optimisation mettent à profit les données provenant d'un réseau déjà en place et portant sur une période d'observation suffisamment longue pour qu'il soit possible d'établir comme il convient les propriétés des champs météorologiques. Elles se fondent sur des analyses statistiques à la fois temporelles et spatiales de séries chronologiques. Il est difficile d'anticiper la durée de la période sur laquelle doivent porter les séries de données, car le nombre d'années qu'il faut pour parvenir à mettre en évidence les caractéristiques de la variabilité et de l'évolution du climat peut varier en fonction de l'élément climatique considéré. On part généralement du principe qu'il faut disposer d'observations quotidiennes sur une période d'au moins dix ans pour produire les paramètres statistiques fondamentaux propres à la plupart des éléments et sur une période d'au moins trente ans dans le cas des précipitations. Les observations de l'évolution et de la variabilité du climat à l'échelle mondiale et régionale réalisées dans de nombreuses régions du globe au cours du siècle écoulé semblent cependant indiquer que des relevés portant sur des périodes aussi courtes risquent de ne pas être particulièrement représentatifs de périodes analogues à venir.

Parmi les solutions d'optimisation possibles, les responsables de réseaux ont la possibilité de rechercher l'existence de stations redondantes, ce qui leur permet, par exemple, d'éliminer de telles stations pour réduire les coûts ou d'utiliser les ressources pour mettre en place de nouvelles stations en des lieux où les observations contribueront mieux à atteindre les objectifs du réseau. Ils devraient tirer parti de la cohérence spatiale relativement élevée correspondant à certains champs météorologiques, notamment la température. Diverses techniques permettent d'évaluer le degré de redondance de l'information, notamment l'emploi des matrices de variance et covariance spatiales des stations en service, la régression linéaire multiple, l'analyse canonique et les expériences de simulation des systèmes d'observation (voir le chapitre 5).

La densité et la répartition des stations climatologiques qu'il faut mettre en place dans un réseau terrestre couvrant une région donnée sont fonction des éléments météorologiques à observer, de la topographie et de l'utilisation des sols dans la région en question ainsi que des besoins en données relatives à l'élément climatique à étudier. Le taux de variation des éléments climatiques au sein d'une même région diffère d'un élément à l'autre. Un réseau peu dense suffit pour l'étude de la pression en surface, un réseau moyennement dense, pour l'étude des températures

maximales et minimales, et il faut des réseaux très denses pour établir la climatologie des précipitations, du vent, du gel et du brouillard, en particulier dans les régions à la topographie bien marquée.

Les emplacements des stations devraient être choisis de manière à obtenir des caractéristiques du climat représentatives de tous les types de terrain (plaines, régions montagneuses, plateaux, littoral, îles, etc.) et de tous les types de couverture du sol (forêts, zones urbaines, zones agricoles, déserts, etc.) présents dans la région étudiée. La densité du réseau de stations devrait être déterminée en fonction des fins auxquelles les observations sont destinées et les données sont utilisées. Lorsque les données doivent servir à des applications sectorielles dans une région précise, la densité à atteindre devra probablement être plus élevée si les activités humaines sont sensibles au climat ou si les conditions climatiques ont une influence sur la santé; elle le sera moins dans les endroits peu peuplés. La planification des réseaux terrestres nécessite souvent des compromis entre la densité optimale des stations et les ressources dont on dispose pour installer, exploiter et administrer les stations.

Les stations du Réseau synoptique de base régional (RSBR), qui recueillent des données climatologiques mensuelles en surface, devraient être réparties de façon suffisamment dense pour que les utilisateurs des observations puissent disposer d'une description exacte de l'atmosphère.

Le réseau de stations climatologiques devrait donner une représentation satisfaisante des caractéristiques climatiques de tous les types de terrain se trouvant sur le territoire du Membre concerné (plaines, régions montagneuses, plateaux, zones côtières, îles, etc.). Les RSBR de stations d'observation en surface et en altitude et les réseaux climatologiques de base régionaux (RCBR) de stations climatologiques seront mis en place pour répondre aux exigences formulées par les conseils régionaux (voir *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), partie III, 2.1.3.2).

Chaque Membre devrait mettre en place et maintenir en service au moins une station climatologique de référence dont les données doivent permettre de déterminer les tendances du climat. Ces stations doivent fournir des séries d'observations homogènes portant sur une période de plus de 30 ans et devraient être situées sur des emplacements où des modifications du milieu dues aux activités humaines se sont rarement produites et ont peu de chance de se produire. On trouvera des indications sur les réseaux et les stations d'observation agrométéorologique et hydrométéorologique respectivement dans le *Guide des pratiques de météorologie agricole* (OMM-N° 134) et le *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM-N° 168), ainsi que des indications supplémentaires dans le *Manuel du Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM* (OMM-N° 1160).

À l'échelon national, les activités d'information sur l'environnement incombent souvent à différentes entités dont les contributions sont complémentaires et parfois redondantes. Pour un pays, le fait que l'information sur l'environnement soit recueillie et diffusée à la fois par des organismes publics et des entités non gouvernementales (y compris des sociétés privées, des services de distribution et des universités) représente un avantage. Pour optimiser les ressources, il est tout à fait souhaitable que des partenariats officiels soient établis entre les SMHN et ces autres parties. Étant donné que les données et informations recueillies auprès de sources autres que les SMHN ne sont généralement pas soumises au contrôle de ces derniers, il est indispensable, pour pouvoir les utiliser à bon escient, de disposer des métadonnées correspondantes. Comme dans le cas des stations exploitées par les SMHN, il convient donc d'obtenir des métadonnées dûment étayées sur les instruments, l'emplacement de la station, les procédures de traitement des données, les méthodes appliquées et toute autre indication qui pourrait améliorer l'utilité de l'information. Ces métadonnées doivent en outre être accessibles et conservées avec soin. Pour encourager un échange ouvert et non restrictif d'informations sur l'environnement, y compris les observations météorologiques, il est hautement souhaitable que les SMHN soient autorisés à utiliser l'ensemble des données et informations climatologiques de leurs partenaires, sans aucune restriction, comme s'il s'agissait de leurs propres données. Pour ce faire, des contrats ou des «protocoles d'accord» devront éventuellement être conclus et signés entre les instances dirigeantes des SMHN et des organismes concernés.

Outre les données que recueillent les réseaux ordinaires et privés de stations climatologiques, il existe aussi parfois des données d'observation émanant de réseaux de stations mis en place à titre temporaire pour les besoins de programmes de recherche ou d'étude ou encore des mesures effectuées pour établir des transects ou des profils ponctuels. Les SMHN devraient s'attacher à obtenir de telles données assorties des métadonnées correspondantes. Certes, ces données risquent de ne pas convenir pour un archivage normal, mais elles se révèlent souvent fort utiles en tant qu'informations complémentaires, par exemple pour les enquêtes portant sur des phénomènes extrêmes bien précis. Et quand elles proviennent de régions où les données d'observation sont rares, leur utilité s'en trouve encore accrue.

2.6 FONCTIONNEMENT DES STATIONS ET DES RÉSEAUX

Les indications figurant dans la présente section portent principalement sur les observations effectuées dans les stations climatologiques ordinaires (habituellement deux fois par jour, mais dans certains cas une fois seulement, ces observations comprenant le relevé des extrêmes de température et de la hauteur de précipitation). Elles portent aussi sur les stations pluviométriques (où seules les précipitations sont mesurées une ou plusieurs fois par jour). En ce qui concerne les stations climatologiques principales (qui généralement font aussi fonction de stations d'observation synoptique) et les autres types de stations climatologiques, on peut trouver des dispositions réglementaires et d'orientation dans le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544).

2.6.1 Heures des observations

Dans les stations climatologiques ordinaires et les stations pluviométriques, on devrait procéder à des observations au moins une fois (et de préférence deux fois) par jour à heure fixe, sans modification en cours d'année. Dans les stations climatologiques principales, on doit réaliser des observations au moins trois fois par jour en plus des relevés horaires établis à partir des enregistrements automatiques; cependant, en l'absence d'instruments enregistreurs, les observations ont généralement lieu toutes les heures. D'un point de vue pratique, les heures d'observation devraient correspondre aux horaires de travail des observateurs, soit habituellement une observation le matin et une observation dans l'après-midi ou en soirée. Si le régime de l'heure d'été est appliqué pendant une partie de l'année, il faut prendre des dispositions pour que les observations continuent d'être effectuées à la même heure locale, et il y a lieu d'enregistrer les dates de début et de fin de la période d'heure d'été. Dans toute la mesure du possible, les heures d'observation devraient coïncider avec les heures standard principales ou intermédiaires (0000, 0300, 0600 UTC (temps universel coordonné), et ainsi de suite) prescrites pour les observations synoptiques. Dans les conditions où seule une observation quotidienne se révèle possible, celle-ci doit avoir lieu entre 0700 et 0900 (heure locale standard).

Il y a lieu d'éviter les périodes de la journée correspondant aux minimums et aux maximums de température quand on fixe les horaires des observations climatologiques. La hauteur de précipitation et la température maximale relevée le matin de bonne heure devraient être imputées au jour civil précédent, tandis que la température maximale relevée au cours d'observations effectuées dans l'après-midi ou en soirée devrait l'être au jour civil même de l'observation.

Les heures d'observation varient souvent en fonction des réseaux. Les observations sommaires telles que celles qui portent sur les extrêmes de température et la hauteur totale de précipitation sur une période de 24 heures (par exemple entre 0800 un jour donné et 0800 le lendemain) ne coïncident pas avec celles couvrant une période de 24 heures différente (par exemple entre 0000 et 2400).

Quand une modification des heures d'observation intervient dans un réseau, des observations simultanées devraient être effectuées par un nombre réduit de stations représentatives durant une période comprenant les saisons climatiques principales de la région, aux anciennes et aux nouvelles heures d'observation. Il faut ensuite évaluer ces observations simultanées

pour déterminer si le changement d'horaire a pu causer des erreurs systématiques. Pour la transmission et l'archivage des données, les observations effectuées aux anciennes et aux nouvelles heures doivent correspondre aux mêmes indicatifs de station.

2.6.2 Enregistrement et transmission des observations

Dans une station dotée de personnel, l'observateur, dès qu'il a réalisé une observation, doit inscrire le résultat sur un registre qui est conservé à la station à cet effet. Mais il peut aussi saisir les données ou les transcrire immédiatement sur un ordinateur ou sur un terminal de transmission vers une base de données. Dans certains pays, la législation en vigueur ou certaines entités juridiques (des cours de justice, par exemple) peuvent exiger qu'un relevé sur papier ou une sortie sur imprimante de la saisie initiale soit conservé pour pouvoir servir de pièce justificative en cas de procédure juridictionnelle ou de difficultés éventuelles à faire accepter l'information issue d'une base de données. L'observateur doit veiller à ce qu'un relevé complet et exact de l'observation soit enregistré. Selon une fréquence établie (qui peut aller de l'immédiat à une fois par mois) en fonction des besoins du SMHN, les données inscrites dans le registre de la station (y compris une base de données sur ordinateur) doivent être transcrives sur un formulaire particulier pour être transmises, par courrier ou de façon électronique, à un bureau centralisateur.

Le personnel d'une station climatologique doit veiller à ce que l'information pertinente soit correctement transcrise sur le formulaire de transmission de données. Quand il s'agit de relevés sur papier, il convient d'insister sur la nécessité de bien tenir le registre et les formulaires de transmission et d'y écrire lisiblement. Il est fréquent que les observateurs inscrivent sur le registre davantage de renseignements que ceux strictement requis par le bureau central, comme cela peut arriver en cas de phénomènes météorologiques inhabituels. Dans la station, le registre sur lequel les relevés sont inscrits doit être conservé à portée de main pour que le personnel puisse le consulter afin de répondre à toute demande émanant du bureau central au sujet d'erreurs ou d'omissions éventuelles dans les formulaires de transmission de données. Certains Services demandent aux observateurs d'expédier les registres au centre climatologique national pour qu'ils y soient archivés.

Certains centres climatologiques nationaux demandent au personnel des stations de calculer et d'enregistrer les totaux et les moyennes mensuels des précipitations et de la température pour qu'il soit plus facile de vérifier les données dans l'entité ou le bureau centralisateur. De plus, les données doivent être codées en messages CLIMAT, soit par le centre climatologique soit par l'observateur, comme cela est décrit dans le *Manuel sur le chiffrement des messages CLIMAT et CLIMAT TEMP* (OMM/DT-N° 1188). L'OMM a mis au point un logiciel pour coder les données. Il appartient à l'observateur de noter, dans le registre de la station et sur les formulaires de transmission de données, la nature de tout dommage ou de toute panne constaté sur un instrument ainsi que l'heure à laquelle cela s'est produit et d'en faire de même pour les activités de maintenance et pour tout changement touchant l'équipement ou l'exposition de la station. De tels événements peuvent en effet avoir une influence considérable sur les données d'observation et, par conséquent, sur les relevés climatologiques. Le cas échéant, des instructions devraient être fournies au sujet de la transmission électronique des données d'observation. De même, lorsque les formulaires de transmission de données sont expédiés par courrier postal, les instructions correspondantes devraient être fournies à la station, ainsi que des enveloppes timbrées, libellées au nom et à l'adresse du centre climatologique destinataire.

2.6.3 Contrôle de la qualité sur site

Des indications générales sur le contrôle de la qualité sur site pour ce qui concerne les observations et les messages d'observation sont données dans le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), partie III, 2.7.3. Le *Guide du Système mondial d'observation* (OMM-N° 488, partie III, 3.1.3.14, et partie VI) apporte à ce sujet davantage de précisions. Les procédures décrites ci-après s'appliquent aux cas où un observateur ou tout autre membre compétent du personnel est présent sur place.

Il y a lieu d'effectuer des contrôles pour déceler des erreurs flagrantes par rapport aux extrêmes déjà enregistrés et pour vérifier la cohérence interne des séries d'observations, la cohérence temporelle des séries de dates et d'heures d'observation, la cohérence par rapport à d'autres éléments et aux calculs et l'exactitude des copies et des messages codés. Ces contrôles peuvent être réalisés manuellement ou suivant des procédures automatisées. En cas d'erreurs, il convient de prendre des mesures appropriées, et notamment de corriger les données initiales et le formulaire avant transmission. Si les erreurs sont décelées après transmission des données, il faut néanmoins les rectifier et envoyer un nouveau message d'observation corrigé. En réponse à toute demande relative à la qualité des données émanant d'une source externe, il faut aussi procéder à des contrôles et, le cas échéant, enregistrer toute modification requise et transmettre les corrections. Lorsque le relevé d'une observation originale comporte une erreur, il faut y ajouter une annotation ou un indicateur précisant que la valeur originale est erronée ou suspecte. Dans le cadre d'un contrôle de la qualité sur site, il faut aussi vérifier que les capteurs et la station conservent bien leur exposition standard et que les procédures correctes de lecture des instruments et de vérification des diagrammes d'enregistrement sont bien suivies.

Il convient d'analyser toutes les formes d'erreur de mesure pour vérifier, par exemple, si elles sont imputables à la dérive ou au mauvais fonctionnement d'un instrument et de rédiger des résumés mensuels ou annuels des insuffisances en matière de données ou de messages.

2.6.4 Fonctions générales des observateurs

Les fonctions des observateurs sont en général définies par le SMHN de chacun des Membres. Ces fonctions devraient comprendre la bonne exécution des tâches suivantes:

- a) Réaliser, à l'aide des instruments appropriés, des observations climatologiques offrant l'exactitude requise;
- b) Procéder aux contrôles de la qualité appropriés;
- c) Coder et transmettre les observations en l'absence de systèmes automatiques de codage et de communication;
- d) Entretenir les appareils enregistreurs et les enregistreurs électroniques de données *in situ* et changer notamment les diagrammes, s'il y a lieu;
- e) Établir ou compiler les relevés hebdomadaires ou mensuels de données climatologiques, particulièrement en l'absence de systèmes automatiques appropriés;
- f) Réaliser des observations supplémentaires ou de remplacement lorsque l'équipement automatique se trouve hors service ou n'assure pas l'observation de tous les éléments prescrits.

2.6.5 Formation professionnelle des observateurs

Les observateurs devraient recevoir, de la part d'un service météorologique habilité, une formation ou un diplôme garantissant qu'ils possèdent les compétences voulues pour réaliser des observations conformes aux normes en vigueur. Ils devraient être capables d'interpréter et d'adapter à leurs propres systèmes d'observation les instructions concernant l'emploi des instruments et des techniques manuelles. Le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8) donne des indications sur les exigences en matière de formation des observateurs dans le domaine des instruments.

Les observateurs sont souvent des bénévoles ou des salariés à temps partiel ou alors réalisent des observations en plus de leurs autres fonctions. Certains n'ont reçu qu'une formation succincte, voire aucune formation, en climatologie ou en matière d'observation scientifique et sont donc tributaires d'un ensemble approprié d'instructions figurant dans des manuels rédigés avec grand soin et mis spécialement à leur disposition dans toutes les stations climatologiques ordinaires et

pluviométriques. Ces instructions doivent être dépourvues d'ambiguïté et décrire simplement les tâches à mener à bien, en se limitant à l'information que l'observateur doit connaître pour remplir ses tâches de façon satisfaisante. Il est possible d'avoir recours à des illustrations, des graphiques et des exemples pour stimuler l'intérêt de l'observateur et favoriser la compréhension des tâches à accomplir quotidiennement. Des modèles de pages dûment remplies du registre de la station et du formulaire de transmission de données devraient figurer dans les manuels mis à la disposition des observateurs. En principe, un représentant du centre climatologique devrait venir sur l'emplacement choisi, installer la station et former l'observateur.

Un observateur doit se familiariser avec les instruments et devrait en particulier connaître les sources d'erreur éventuelles liées à leur lecture. Les instructions devraient comprendre un descriptif de chaque instrument, accompagné d'illustrations simples destinées à expliquer le fonctionnement. Elles doivent aussi fournir des indications détaillées sur les méthodes à utiliser pour l'entretien quotidien des instruments, les activités simples de maintenance et les contrôles d'étalonnage. Lorsque certaines tâches particulières d'observation ou d'enregistrement de données nécessitent l'emploi de tables de correction ou d'étalonnage, l'observateur doit bien en connaître l'usage. Les instructions devraient aussi porter sur le fonctionnement des outils informatiques utilisés pour saisir les données et les transmettre.

Les instructions doivent porter aussi bien sur les observations visuelles que sur les observations instrumentales. Les observations visuelles sont particulièrement sujettes aux erreurs subjectives, et leur exactitude est fonction de la compétence et de l'expérience de l'observateur. Comme il est très difficile de contrôler l'exactitude ou la validité d'une observation visuelle particulière, il y a lieu de fournir autant d'indications que possible à ce sujet pour que les observations soient réalisées correctement.

En complément des manuels d'instructions, il appartient aux membres du personnel du Service climatologique chargés de l'exploitation des stations de communiquer avec le personnel des stations lorsque des erreurs d'observation se répètent ou que des instructions sont mal interprétées. Des visites d'inspection régulières fournissent l'occasion d'aborder les problèmes liés à l'emplacement ou aux instruments et de parfaire la formation des observateurs.

Certains centres climatologiques organisent des cours de formation s'adressant spécialement à des groupes d'observateurs bénévoles. Ces cours contribuent en particulier à assurer une bonne qualité uniforme des observations et à dégager du temps pour aborder un plus grand nombre de problèmes que ne pourrait en évoquer un seul observateur à l'occasion d'une visite sur site.

2.6.6 **Inspection des stations**

Les stations climatologiques principales devraient être inspectées une fois par an et les stations climatologiques ordinaires et pluviométriques, au moins une fois tous les trois ans – ou plus fréquemment si nécessaire –, de manière à assurer l'entretien et le bon fonctionnement des instruments et à garantir ainsi un niveau de qualité élevé des observations. Quant aux stations automatiques, elles devraient être inspectées au moins tous les six mois. Les dispositions spéciales concernant l'inspection des instruments à bord des navires figurent dans le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8).

Avant chaque tournée d'inspection, l'inspecteur devrait déterminer, dans toute la mesure du possible, la qualité de l'information et des données reçues de chaque station figurant sur son itinéraire. À l'occasion de chaque inspection, il y a lieu de confirmer que:

- Le niveau de formation de l'observateur est à jour;
- L'observateur demeure compétent;
- L'emplacement et l'exposition des divers instruments sont connus, enregistrés et toujours les meilleurs possibles;

- d) Les instruments sont d'un modèle approuvé, en bon état et vérifiés régulièrement par comparaison avec les étalons appropriés;
- e) Les méthodes d'observation et les modes de calcul des grandeurs dérivées des observations sont uniformes;
- f) Le registre de la station est bien tenu;
- g) Les formulaires de transmission de données sont expédiés avec ponctualité et régularité au centre climatologique.

Il est bon de faire figurer, dans les rapports d'inspection, des croquis, des photographies ou des diagrammes de l'emplacement réel de la station d'observation, indiquant les caractéristiques physiques du voisinage qui peuvent avoir un effet sur les valeurs observées des éléments climatiques. Il faut aussi y dresser une liste de tous les changements concernant les instruments, de tous les écarts enregistrés entre les valeurs fournies par les instruments de la station et celles fournies par les étalons voyageurs, des changements d'exposition ou des modifications des caractéristiques de l'emplacement par rapport à la visite précédente et des dates des comparaisons et des changements appropriés. Les inspecteurs doivent aussi pouvoir proposer des solutions aux observateurs qui éprouvent des difficultés à transmettre comme il convient leurs données, y compris au sujet des systèmes automatiques de saisie et de transmission des données. Les rapports d'inspection, qui représentent une source importante de métadonnées servant à s'assurer de l'homogénéité des relevés climatologiques, devraient être conservés indéfiniment, ou l'on devrait procéder au transfert de l'information qu'ils contiennent dans une base de données informatique (voir 3.1).

2.6.7 Préservation de l'homogénéité des données

Contrairement aux observations servant uniquement à la production de prévisions et d'avis, les relevés climatologiques continus et ininterrompus constituent la base de nombreuses études importantes auxquelles participent divers acteurs du secteur de la climatologie. Les jeux de données homogènes sur le climat revêtent une importance cruciale lorsqu'il s'agit de satisfaire les besoins de la recherche, des applications et de la prestation de services en matière de climat.

La modification de l'emplacement d'une station ou son déplacement comptent parmi les principales causes à l'origine d'un manque d'homogénéité. Les dix principes relatifs à la surveillance du climat (voir 2.1) devraient être appliqués lorsque le déplacement d'une station climatologique se révèle indispensable, qu'une station doit être remplacée par une autre située à proximité ou que les systèmes d'instruments évoluent. Dans la mesure où cela est réalisable, des observations simultanées devraient être effectuées – sur l'ancien et le nouvel emplacement ou avec les anciens et les nouveaux instruments – pendant une période de chavauchement d'au moins une année, et de préférence de deux ou plusieurs années, afin de déterminer les effets des modifications apportées aux instruments ou à l'emplacement des stations sur les données climatologiques. Pour la transmission et l'archivage des données, les observations provenant de l'ancien et du nouvel emplacement devraient porter le même indicatif de station. La publication intitulée *Directives pour la gestion des changements apportés aux programmes d'observation du climat* (OMM/DT-N° 1378) fournit des indications précises à ce sujet.

2.6.8 Contrôle des messages aux centres de collecte

Il incombe aux centres de collecte ou d'archivage des données de vérifier que les observateurs ont bien transmis l'information à l'heure prévue et que les données sont de bonne qualité. Ils doivent aussi s'occuper des données provenant des systèmes de mesure ou de transmission automatiques. Comme le traitement assuré par ces centres porte normalement sur de gros volumes de données, l'utilisation de systèmes de vérification informatiques faciliterait considérablement la tâche.

Il faut tout d'abord vérifier que les observations attendues sont bien arrivées et qu'elles ont été transmises à l'heure correcte. Dans le cas contraire, il faut communiquer avec l'observateur pour en déterminer la raison. Quand il s'agit de systèmes automatiques, le «gardien» doit rechercher tout signe visible de panne et en informer dès que possible les instances responsables de la maintenance des systèmes d'observation et de transmission.

Au sujet de la qualité des données transmises par les stations automatiques et les stations dotées de personnel, les contrôles devraient comprendre ceux décrits dans la section 2.6.3. D'autres vérifications sont utiles et faciles à intégrer dans le processus de contrôle informatisé. Il s'agit notamment de vérifications par rapport aux données provenant de stations voisines, de diverses vérifications statistiques, de vérifications par rapport à des seuils prédéfinis, ainsi que de vérifications de cohérence temporelle et de cohérence entre les divers éléments. Certaines techniques de vérification de données sont décrites dans les chapitres 4 et 5.

Les contrôles effectués peu après la réalisation des observations, à la station ou à distance, présentent peu d'intérêt si rien n'est fait pour remédier rapidement aux problèmes. L'information doit être portée à la connaissance des observateurs, des gardiens, des inspecteurs, des personnes chargées de la maintenance des instruments ou des systèmes ou des fabricants, et le centre de contrôle doit être ensuite informé des mesures prises. Il faut en outre garder copie de tous les messages.

2.6.9 Documentation relative à la station et métadonnées

Les observations seules présentent un intérêt très limité; elles doivent être accompagnées de métadonnées (données qui décrivent les données) adéquates pour que leur potentiel puisse être pleinement exploité. Ces métadonnées sont essentielles et devraient être tenues à jour et largement mises à disposition sous forme de catalogues de stations, d'inventaires de données et de fichiers de données climatologiques. L'OMM a mis au point des normes applicables aux métadonnées qui se fondent sur les normes déjà établies à ce sujet par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), et notamment les normes ISO de la série 19100 (voir la publication intitulée *Norme relative aux métadonnées du WIGOS* (OMM-N° 1192). Ces normes font partie du Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM (WIGOS), qui fournit le cadre au sein duquel sont réunis tous les systèmes d'observation de l'Organisation et les contributions de celle-ci aux systèmes d'observation coparrainés, à l'appui de l'ensemble des programmes et des activités de l'Organisation (voir le *Manuel du Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM* (OMM-N° 1160)).

Les observations effectuées dans le cadre du WIGOS constituent un éventail extrêmement large de données, issues de l'observation manuelle comme de combinaisons complexes de bandes de fréquences hyperspectrales, obtenues *in situ* ou par télédétection, unidimensionnelles ou pluridimensionnelles, brutes ou traitées. Il est par nature difficile de définir une norme relative aux métadonnées qui soit exhaustive et englobe tous les types d'observations. Un utilisateur devrait être en mesure, grâce aux métadonnées du WIGOS, de savoir dans quelles conditions les observations (ou les mesures) ont été réalisées et de prendre en compte tout autre aspect susceptible d'influer sur leur utilisation ou leur interprétation.

Les principales métadonnées relatives aux stations sont les suivantes: nom et indicatif(s) de la station; coordonnées géographiques; altitude au-dessus du niveau moyen de la mer; administrateur ou propriétaire; types de sol, constantes physiques et profil du sol; types de végétation et état de la végétation; description de la topographie locale; description des modes d'utilisation des sols aux alentours; photographies et graphiques des instruments, de l'emplacement et des alentours; type de SMA, nom du fabricant, modèle et numéro de série; programme d'observation de la station (éléments mesurés, heure de référence, heures d'observation ou de mesure, heures de transmission des données et niveau de référence pour la mesure de la pression atmosphérique à la station); et renseignements permettant de communiquer avec quelqu'un sur place (nom et adresse postale, adresse électronique, numéros de téléphone, etc.).

La documentation devrait comprendre l'historique complet de la station et fournir les dates et les détails de tous les changements intervenus. Cela va de la création de la station à sa fermeture éventuelle, en passant par le commencement des observations et toutes les interruptions de service. Il importe d'y joindre les comptes rendus des visites d'inspection (voir 2.6.6), en particulier les remarques portant sur l'emplacement, l'exposition, la qualité des observations et le fonctionnement de la station.

Les métadonnées relatives aux instruments qu'il convient de consigner sont les suivantes: type de capteur, nom du fabricant, modèle et numéro de série; principe de fonctionnement; méthode de mesure ou d'observation; type de système de détection; caractéristiques de fonctionnement; unité de mesure et plage de mesure; résolution, exactitude (degré d'incertitude), constante de temps, résolution temporelle et temps d'intégration des valeurs moyennes; choix de l'emplacement et exposition (lieu, protection et hauteur au-dessus du sol ou profondeur); date d'installation; acquisition des données (intervalle d'échantillonnage et intervalle et type d'intégration des valeurs moyennes); procédures de correction; données sur l'étalonnage précisant la date et l'heure; maintenance préventive et corrective (activités de maintenance et d'étalonnage recommandées et prévues, y compris fréquence et description de ces activités); et résultats de la comparaison avec des étalons voyageurs.

Pour chacun des éléments météorologiques, voici les types de métadonnées sur le traitement des observations qu'il convient de consigner: programme de mesure ou d'observation (heures d'observation, fréquence de transmission, sortie de données); méthode, procédure et algorithme de traitement des données; formules de calcul; mode d'observation ou de mesure; intervalle de traitement; résolution indiquée; source du signal (instrument et élément); et constantes et valeurs des paramètres.

Les métadonnées relatives à la gestion des données devraient porter notamment sur les procédures et les algorithmes de contrôle de la qualité, la définition des indicateurs de contrôle de la qualité, les constantes et les valeurs des paramètres et les procédures de traitement et de stockage. Les métadonnées sur la transmission des données présentant un intérêt sont les suivantes: mode de transmission, forme de présentation des données, heures de transmission et fréquence de transmission.

Pour les stations d'observation en altitude, les besoins en métadonnées sont sensiblement les mêmes que ceux qui s'appliquent aux stations d'observation en surface. Il convient en outre de disposer de métadonnées sur tous les instruments non récupérables utilisés (notamment les radiosondes).

Des indications particulières sont données dans la publication intitulée *Norme relative aux métadonnées du WIGOS* (OMM-N° 1192) et font ressortir la nécessité de préciser la variable observée et d'indiquer pourquoi, où et comment l'observation a été effectuée, la façon dont les données brutes ont été traitées et le degré de qualité de l'observation.

BIBLIOGRAPHIE

- Organisation météorologique mondiale, 1983, 1996, 2008, 2014: *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8). Cinquième, sixième, septième et huitième éditions. Genève.
- _____, 1994: *Guide des applications de la climatologie maritime* (OMM-N° 781). Genève.
- _____, 1994: *Observer l'environnement de la planète: le temps, le climat et l'eau* (OMM-N° 796) (par J.P. Bruce). Genève.
- _____, 1995: *GCOS Guide to Satellite Instruments for Climate* (WMO/TD-No. 685, GCOS-No. 16). Genève.
- _____, 1995: *GCOS Plan for Space-Based Observations* (WMO/TD-No. 684, GCOS-No. 15), version 1.0. Genève.
- _____, 1995: *Plan for the Global Climate Observing System (GCOS)* (WMO/TD-No. 681, GCOS-No. 14), version 1.0. Genève.
- _____, 1997: *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel*, troisième session (Tokyo, Japon, 15–18 juillet 1997) (WMO/TD-No. 847, GCOS-No. 39). Genève.
- _____, 1998: *Preliminary Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (WMO/TD-No. 913, SAT-21). Genève.
- _____, 1999: *Representativeness, Data Gaps and Uncertainties in Climate Observations* (exposé présenté par Chris Folland lors du Treizième Congrès météorologique mondial, 21 mai 1999) (WMO/TD-No. 977, WCDMP-No. 44). Genève.
- _____, 2000: *SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour* (WMO/TD-No. 1043, WCRP-No. 113). Genève.
- _____, 2000: *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO 2000) – Lightning Detection Systems* (WMO/TD-No. 1028). Genève.
- _____, 2000: *Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (SAT-22, WMO/TD-No. 992). Genève.
- _____, 2002: *Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks: GSN and GUAN* (WMO/TD-No. 1106, GCOS-No. 73), version 1.1. Genève.
- _____, 2003: *Report of the Capacity Building Training Workshop on Reducing the Impacts of Climate Extremes on Health* (WCASP-No. 59, WMO/TD-No. 1162). Genève.
- _____, 2003: *Guidelines on Climate Observation, Network and Systems* (WMO/TD-No. 1185, WCDMP-No. 52), Genève.
- _____, 2004: *The Changing Atmosphere: An Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation Theme for the IGOS Partnership*. Rapport de la VAG N° 159 (WMO/TD-No. 1235, ESA SP-1282). Genève.
- _____, 2004: *Guidelines on Climate Data Rescue* (WMO/TD-No. 1210, WCDMP-No. 55). Genève.
- _____, 2004: *Manuel sur le chiffrement des messages CLIMAT et CLIMAT TEMP* (OMM/DT-N° 1188). Genève.
- _____, 2004: *Implementation Plan for the Global Climate Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1219, GCOS-No. 92). Genève.
- _____, 2006: *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (WMO/TD-No. 1250). Genève.
- _____, 2006: *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate* (WMO/TD-No. 1338, GCOS-No. 107). Genève.
- _____, 2006: *Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume III: Hydrologie. Genève.
- _____, 2007: *Directives pour la gestion des changements apportés aux programmes d'observation du climat* (OMM/DT-N° 1378, PMDSC-N° 62). Genève.
- _____, 2008: *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM-N° 168), Volume I: Hydrologie – De la mesure à l'information hydrologique. Genève.
- _____, 2009: *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM-N° 168), Volume II: Gestion des ressources en eau et application des pratiques hydrologiques. Genève.
- _____, 2009: *Guideline for the Generation of Satellite-based Datasets and Products Meeting GCOS Requirements* (GCOS-128, WMO/TD-No. 1488). Genève.
- _____, 2010: *Guide du Système mondial d'observation* (OMM-N° 488). Genève.
- _____, 2010: *Guide des pratiques de météorologie agricole* (OMM-N° 134). Genève.
- _____, 2011: *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544)), Volume II: Aspects régionaux. Genève.
- _____, 2014: *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8), mise à jour 2017. Genève.
- _____, 2015: *Manuel du Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM* (OMM-N° 1160). Genève.

- , 2015: *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), Volume I: Aspects mondiaux. Genève.
- , 2016: *Rapport final abrégé, résolutions et décisions de la soixante-huitième session du Conseil exécutif* (OMM-N° 1168), résolution 5 (EC-68) – Compétences en matière de prestation de services climatologiques. Genève.
- , 2016: *Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume II: Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale. Genève.
- , 2017: *Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume I: Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées. Genève.
- , 2017: *Norme relative aux métadonnées du WIGOS* (OMM-N° 1192). Genève.
- , 2017: *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision* (OMM-N° 485). Genève.

AUTRES LECTURES

- Bénichou, P., 1992: Optimisation de l'implantation d'un réseau complémentaire en zone accidentée: application au réseau automatisé d'Auvergne. *La Météorologie*, 43–44: 3–17.
- Christian, H., 2003: Global lightning activity. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Atmospheric Electricity*, Versailles, France, 9–11 juin 2003 (S. Chauzy et P. Laroche, coordinateurs de la publication). Paris, ONERA.
- Cronin, T.M., 1999: *Principles of Paleoclimatology*. New York, Columbia University Press.
- Der Mégréditchian, G., 1985: Méthodes statistiques d'analyse et d'interpolation spatiales des champs météorologiques. *La Météorologie*, 17:51–66.
- Dover, J. et L.J. Winans, 2002: Evaluation of windshields for use in the automated surface observing system (ASOS). In: *Proceedings of the Sixth Symposium on Integrated Observing Systems*, Orlando, Floride, 14–17 janvier 2002. Boston, American Meteorological Society.
- Free, M., I. Durre, E. Aguilar, D. Seidel, T.C. Peterson, R.E. Eskridge, J.K. Luers, D. Parker, M. Gordon, J. Lanzante, S. Klein, J. Christy, S. Schroeder, B. Soden et L.M. McMillin, 2002: Creating climate reference datasets: CARDS workshop on adjusting radiosonde temperature data for climate monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83:891–899.
- Free, M. et D.J. Seidel, 2005: Causes of differing temperature trends in radiosonde upper-air datasets. *Journal of Geophysical Research*, 110:D07101.
- Haas, T.C., 1992: Redesigning continental-scale monitoring networks. *Atmospheric Environment*, 26A:3323–3333.
- Karl, T.R., C.N. Williams Jr, P.J. Young et W.M. Wendland, 1986: A model to estimate the time of observation bias associated with monthly mean maximum, minimum, and mean temperature for the United States. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25:145–160.
- Leroy, M., 1998: Meteorological measurements representativity: nearby obstacles influence. In: *Tenth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Phoenix, Arizona, 11–16 janvier 1998. Boston, American Meteorological Society.
- , 1998: Climatological site classification. In: *Tenth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Phoenix, Arizona, 11–16 janvier 1998. Boston, American Meteorological Society.
- Lieth, H. (éd.), 1974: *Phenology and Seasonality Modeling*. New York, Springer.
- National Climatic Data Center (NCDC), 2002: *U.S. Climate Reference Network Site Information Handbook*. Asheville.
- Ohring, G., B. Wielicki, R. Spencer, B. Emery et R. Datla, 2005: Satellite instrument calibration for measuring global climate change: Report of a workshop. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86:1303–1313.
- Oke, T.R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Deuxième édition. Cambridge, Cambridge University Press.
- , 2006: Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84:179–190.
- Organisation météorologique mondiale, 2003: *Aerosol Measurement Procedures – Guidelines and Recommendations* (WMO/TD-No. 1178, GAW-No. 153). Genève.
- , 2007: *RA IV Training Seminar on Capacity Building in Climate-related Matters* (WMO/TD-No. 1386, WCDMP-No. 63). Genève
- , 2008: *Plant Phenological Guidelines* (WMO/TD-No. 1484, WCDMP-No. 70). Genève
- , 2010: *Implementation Plan for the Global Climate Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1523, GCOS-No.138), mise à jour 2010. Genève.

- , 2012: *Manuel de l'assistance météorologique aux activités maritimes* (OMM-N° 558), Volume I – Aspects mondiaux, Volume II – Aspects régionaux. Genève.
- , 2013: *GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN) – Manual* (Rapport technique N° 2013-02 du WIGOS, GCOS-170). Genève.
- , 2017: *Guide du Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM* (OMM-N° 1165). Genève.
- Panel on Climate Change Feedbacks, Climate Research Committee, National Research Council, 2003: *Understanding Climate Change Feedbacks*. Washington, DC, National Academy Press.
- Panel on Reconciling Temperature Observations, Climate Research Committee, Board on Atmospheric Sciences and Climate, National Research Council, 2000: *Reconciling Observations of Global Temperature Change*. Washington, DC, National Academy Press.
- , 2000: *Improving Atmospheric Temperature Monitoring Capabilities: Letter Report*. Washington, DC, National Academy Press.
- Quadrelli, R. et J.M. Wallace, 2004: A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability. *Journal of Climate*, 17:3728–3744.
- Santer, B.D., M.F. Wehner, T.M.L. Wigley, R. Sausen, G.A. Meehl, K.E. Taylor, C. Ammann, J. Arblaster, W.M. Washington, J.S. Boyle et W. Bruggemann, 2003: Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes. *Science*, 301(5632):479–483.
- Schwartz, M.D. (éd.), 2003: *Phenology: An Integrative Environmental Science. Tasks for Vegetation Science*, Volume 39. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Seidel, D.J. et M. Free, 2006: Measurement requirements for climate monitoring of upper-air temperature derived from reanalysis data. *Journal of Climate*, 19:854–871.
- Singleton, F. et E.A. Spackman, 1984: Climatological network design. *The Meteorological Magazine*, 113:77–89.
- Sneyers, R., 1973: Sur la densité optimale des réseaux météorologiques. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 21:17–24.
- Soden, B.J. et I.M. Held, 2006: An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models. *Journal of Climate*, 19:3354–3360.
- Système mondial d'observation de l'océan (GOOS), 2000: *Report of the First GOOS Users' Forum* (GOOS-No. 92). UNESCO, Paris.
- , 2001: *Principles of the Global Ocean Observing System (GOOS) Capacity Building* (GOOS-No. 69). UNESCO, Paris.
- , 2001: *Stratégie de mise en œuvre pour le renforcement des capacités du Système mondial d'observation de l'océan (GOOS)* (GOOS-N° 106). UNESCO, Paris.
- Thompson, D.W.J. et J.M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, 13:1000–1016.
- Thorne, P.W., D.E. Parker, J.R. Christy et C.A. Mears, 2005: Uncertainties in climate trends: Lessons from upper-air temperature records. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86:1437–1444.
- Thorne, P.W., D.E. Parker, S.F.B. Tett, P.D. Jones, M. McCarthy, H. Coleman et P. Brohan, 2005: Revisiting radiosonde upper-air temperatures from 1958 to 2002. *Journal of Geophysical Research*, 110 (D18):D18105.
- Unninayar, S. et R.A. Schiffer, 1997: *In-Situ Observations for the Global Observing Systems: A Compendium of Requirements and Systems*. Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration Office of Mission to Planet Earth, NP-1997(01)-002-GSFC.
- Wang, J., D.J. Carlson, D.B. Parsons, T.F. Hock, D. Lauritsen, H.L. Cole, K. Beierle et E. Chamberlain, 2003: Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dew-point hygrometer and its climate implication. *Geophysical Research Letters*, 30:10.1029/2003GL016985.
- Zhang, H.-M. et L.D. Talley, 1998: Heat and buoyancy budgets and mixing rates in the upper thermocline. *Journal of Physical Oceanography*, 28:1961–1978.

CHAPITRE 3. GESTION DES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

3.1 INTRODUCTION

Depuis des millénaires, les historiens consignent des informations sur les conditions météorologiques dans leurs chroniques. Cependant, ce sont souvent des informations fondées sur les récits d'autres personnes et non pas sur leurs propres observations. Les récits pouvaient donc être tronqués, trop vagues ou entachés de trous de mémoire. Ce type d'information météorologique est noyé au milieu d'une multitude d'informations de toutes sortes et se trouve la plupart du temps dans des bibliothèques et des archives nationales. La constitution d'archives météorologiques nationales spécialisées est en effet un phénomène relativement récent, puisque les premières datent généralement de la première moitié du XX^e siècle.

Les premiers relevés manuscrits se présentaient sous la forme de recueils quotidiens, hebdomadaires ou mensuels. On y consignait les phénomènes extrêmes ou catastrophiques tels que les températures particulièrement élevées ou basses, les vitesses de vent anormales, les précipitations exceptionnelles ou les sécheresses prolongées, les jours de gel ou de congélation, les ouragans et les tornades. Dans les livres de bord des navires, on notait les tempêtes, les calmes, les vents, les courants, les types de nuage et la nébulosité. Les dates de gel et de fonte des cours d'eau, des lacs et des mers, ainsi que les dates de la première et de la dernière chute de neige de la saison faisaient aussi partie des principaux éléments consignés. Le goût du travail bien fait et le sentiment d'accomplissement ont toujours caractérisé l'observation météorologique et l'enregistrement des données. Encore de nos jours, c'est la personne chargée de réaliser une observation qui, en signant ou cachetant le registre, authentifie les relevés et personnalise l'aperçu historique enregistré.

Des registres consacrés spécialement à la collecte et à la conservation de l'information climatologique sont utilisés depuis deux ou trois siècles. Jusque dans les années 1940, les observations étaient presque toujours notées à la main et souvent sur des formulaires propres au pays. Depuis lors, et particulièrement après la création de l'OMM, les formulaires et procédures normalisés se sont peu à peu imposés, et les archives météorologiques nationales ont été désignées comme centres d'archivage des relevés.

La quantification des données climatologiques, qui s'est développée grâce à l'amélioration des instruments, a facilité l'observation de variables continues et discrètes ainsi que l'enregistrement des valeurs dans des registres. Citons par exemple les thermomètres, qui ont permis d'enregistrer de façon systématique les valeurs mesurées de la température, et les pluviomètres, qui ont facilité la mesure des précipitations. La mise au point de mécanismes à mouvement d'horlogerie a permis de relever et d'enregistrer des valeurs d'intensité et de durée. D'autres types d'instruments d'enregistrement ont permis d'établir des relevés automatiques ou analogiques. Plus les moyens d'observation se sont perfectionnés et multipliés, plus le nombre d'éléments ou de variables à noter dans les registres a augmenté, et il a fallu mettre au point des formes de présentation spécialement adaptées. Si les formes de présentation ont évolué, la régularité et la cohérence – ou la continuité des relevés – ont toujours été éminemment souhaitables. Un relevé chronologique de qualité devrait être tenu à jour et se présenter suivant un ordre séquentiel. Pour faciliter la collecte et l'archivage des données et l'utilisation ultérieure des relevés, il faut que l'observation et l'enregistrement soient exécutés avec soin et méthode.

Dans la plupart des pays, les formulaires remplis à la main étaient expédiés périodiquement à un centre. Jusqu'aux années 1970, ces formulaires originaux constituaient l'essentiel de tous les stocks d'information climatologique en possession de la plupart des centres de collecte. Ces centres faisaient partie d'administrations locales ou nationales ou étaient rattachés à l'office central d'un secteur d'activité tel que l'exploitation minière, l'agriculture ou l'aviation. Peu à peu, les activités de rassemblement des données climatologiques ayant une incidence sur la vie du pays furent regroupées au sein d'un programme concerté d'observation et de collecte destiné à servir des intérêts nationaux et internationaux.

Depuis la fin du XX^e siècle, la plupart des informations météorologiques sont transmises numériquement à des centres de collecte nationaux. Les messages étant destinés principalement à la prévision opérationnelle du temps, les centres climatologiques du monde entier se réfèrent généralement aux documents contenant les observations d'origine pour établir des relevés climatologiques. La collecte, la transmission, le traitement et le stockage des données météorologiques opérationnelles se sont cependant considérablement améliorés grâce aux progrès rapides de l'informatique. Aussi les archives météorologiques abritent-elles de plus en plus de données jamais notées sur papier. La puissance et la facilité d'utilisation des ordinateurs, la capacité d'enregistrer et de transmettre l'information de façon électronique et la mise au point de mécanismes d'échanges internationaux tels que l'Internet fournissent aux climatologues de nouveaux moyens d'améliorer rapidement leur compréhension du climat.

Tout devrait être mis en œuvre pour recueillir, sous forme numérique électronique, toutes les données d'observation primaires. La collecte électronique des données à la source permet un contrôle automatique et rapide des mesures effectuées, y compris la vérification des erreurs, avant même la transmission des données à partir de la station d'observation. Dans de nombreux cas, la collecte des données climatologiques par courrier postal peut encore se révéler meilleur marché et plus fiable, en particulier dans les régions les moins avancées du point de vue technologique; toutefois, à moins que les données aient été enregistrées sur support électronique avant leur envoi par la poste, il faudra les scanner ou les numériser au centre de collecte. La gestion de la grande diversité des données recueillies à des fins météorologiques ou climatologiques nécessite une approche systématique visant à rassembler les relevés sur papier, sur microdocuments et sous forme numérique. Le cadre et les spécifications propres à une approche systématique sont indiqués dans la publication intitulée *Climate Data Management System Specifications* (WMO-No. 1131).

Le présent chapitre est consacré aux notions et considérations générales concernant la gestion des données climatologiques. On trouvera des informations et des indications détaillées sur des aspects particuliers tels que les besoins du Système de gestion des données climatologiques (CDMS) dans les documents de référence dont la liste figure à la fin du présent chapitre.

3.2 IMPORTANCE ET OBJET DE LA GESTION DES DONNÉES

La gestion des données climatologiques a essentiellement pour but de préserver et de saisir les données et produits sur le climat et à y donner accès pour que les planificateurs, les décideurs et les chercheurs puissent les utiliser. L'archivage permanent est un objectif important. Le système de gestion des données des archives climatologiques doit fournir l'information permettant de décrire le climat selon le domaine d'intérêt pour lequel les archives ont été créées, qu'il soit national, régional ou mondial. Les données issues des réseaux météorologiques et climatologiques ainsi que de divers programmes de recherche constituent une ressource utile et souvent unique, acquise au prix d'efforts considérables ayant nécessité beaucoup de temps et d'argent. Quand on planifie un programme d'acquisition de données, il est impossible d'entrevoir toutes les utilisations possibles des données climatologiques; il arrive en effet fréquemment que de nouvelles applications voient le jour longtemps après l'acquisition des données. L'utilisation initiale des données météorologiques et connexes n'est souvent que la première de toute une série d'applications. Les analyses de données réalisées ultérieurement à des fins multiples et variées ne cessent d'améliorer sensiblement le retour sur investissement que représentent les programmes d'acquisition de données. Notons à titre d'exemple que, depuis que la question des changements climatiques préoccupe la planète, les besoins en données sur le climat et en systèmes de gestion de données sont sans commune mesure avec ceux qu'on avait pu prévoir au moment de la création des réseaux. Pour pouvoir satisfaire ces besoins grandissants, il est d'une importance capitale que l'information climatologique, tant actuelle qu'historique, soit gérée de manière systématique et complète. Aux données météorologiques classiques s'ajoutent désormais des données provenant d'un large éventail d'instruments et de systèmes nouveaux, y compris les satellites, les systèmes radar et autres dispositifs de télédétection; il est donc indispensable pour les centres climatologiques modernes de se doter de systèmes de gestion des données climatologiques à la fois efficaces et exhaustifs.

Pour que les données climatologiques soient les plus utiles possible, il faut qu'elles aient été vérifiées et aient subi un contrôle de qualité, qu'elles soient stockées dans des archives nationales ou un centre climatologique et qu'elles soient facilement accessibles sous des formes simples à utiliser. Bien que les innovations technologiques se succèdent à un rythme soutenu, bon nombre de relevés climatologiques stockés par les SMHN se présentent encore sous une forme non numérique. Ces relevés doivent être gérés avec des relevés numériques sans cesse plus nombreux. Un CDMS est un système informatique intégré permettant d'archiver, de gérer, d'analyser, de diffuser et d'utiliser efficacement un vaste éventail de données climatologiques intégrées.

La gestion des bases de données vise avant tout à garantir à tout moment l'intégrité de la base de données considérée et à veiller à ce que celle-ci contienne toutes les données et métadonnées nécessaires à l'atteinte des objectifs fixés initialement, au moment présent et à l'avenir. Les systèmes de gestion des bases de données ont révolutionné la gestion des données climatologiques, car ils offrent un moyen efficace de stockage, d'accès, de conversion et de mise à jour pour de nombreux types de données et renforcent la sécurité des données.

Il est indispensable de tenir compte des besoins et des capacités des utilisateurs actuels et futurs pour ce qui concerne à la fois la mise au point des bases de données climatologiques et la mise en œuvre des pratiques de gestion des données. Même si cela semble aller de soi, il arrive qu'on omette des données qui sont importantes pour une application utile ou que des centres de données consacrent trop peu de ressources au contrôle de la qualité des données pour lesquelles les utilisateurs exigent explicitement ou implicitement un degré élevé de qualité. Par exemple, une base de données qui ne contiendrait pas les codes météorologiques tant actuels qu'anciens pourrait donner lieu à des sous-estimations de la fréquence des phénomènes observés. Pour étudier toute nouvelle évolution, les responsables de la gestion des données devraient soit s'assurer de la présence d'au moins un utilisateur clé dans l'équipe de projet, soit mettre en place des consultations régulières auprès du groupe d'utilisateurs afin de se tenir au courant de l'évolution des besoins et de toute question préoccupant les utilisateurs. Les secteurs demandeurs sont notamment la prévision du climat, l'évolution du climat, l'agriculture, la santé publique, la gestion des catastrophes et des situations d'urgence, l'énergie, la gestion des ressources naturelles, l'aménagement urbain, le secteur financier et l'assurance.

3.2.1 Conception des systèmes de gestion des données climatologiques

Tous les systèmes de gestion des données climatologiques (CDMS) reposent sur un modèle de données sous-jacent. La conception de ce modèle revêt une grande importance pour la qualité du système qui sera mis au point (figure 3.1). Si le modèle n'est pas adapté, le système sera plus difficile à élaborer et à exploiter. En général, une base de données conçue pour des données météorologiques actuelles permettra une extraction rapide des données récentes issues d'un grand nombre de stations. En revanche, dans beaucoup d'applications des données climatologiques, il s'agit surtout d'extraire les données d'une ou de quelques stations sur une période de longue durée. Il est essentiel de bien consigner l'ensemble du processus de conception du CDMS, y compris la description du modèle de données sous-jacent, pour faciliter la tâche des programmeurs en cas d'extension ou de modification ultérieure. Les préoccupations seront sensiblement les mêmes dans le cas d'un modèle de métadonnées. On trouvera des informations détaillées sur les modèles de données dans la publication intitulée *Principes directeurs pour la gestion de données climatologiques* (OMM/DT-N° 1376), «Modèles de données utilisés par les systèmes de gestion de bases de données climatologiques», pp. 28–29, et dans la publication intitulée *Climate Data Management System Specifications* (WMO-No. 1131), 4.2.3 et 4.3.

La composante relative aux données climatologiques représente un large éventail de séries chronologiques sur le climat. Son champ d'application déborde largement de ce qu'on peut considérer comme des observations météorologiques classiques et comprend:

- Les variables climatologiques essentielles du Système mondial d'observation du climat (SMOC);

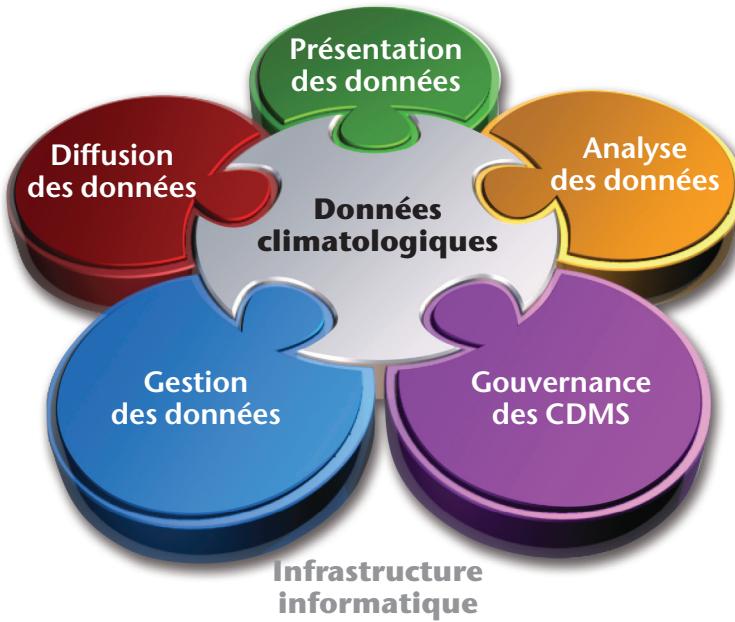


Figure 3.1. Caractérisation graphique des principales composantes fonctionnelles d'un système de gestion des données climatologiques

- b) Une vision/vue élargie des métadonnées climatologiques, qui englobe des métadonnées sur la provenance des données d'observation et de recherche;
- c) Les produits standard de l'OMM;
- d) Des observations dérivées et des données aux points de grille;
- e) Des sorties de modèles numériques;
- f) Une série de données auxiliaires utilisées à l'appui des CDMS, y compris des données spatiales et d'impact, une documentation et un logiciel sur le climat;
- g) D'autres données importantes comme des modèles logiques de données.

La composante relative à la gouvernance des CDMS se réfère à un ensemble cohérent de politiques et de processus de gouvernance nécessaires pour établir un fondement solide en vue de la constitution et de la gestion de sources fiables de données climatologiques et de services connexes. Bien qu'il soit prévu que l'OMM lance en temps voulu un certain nombre d'initiatives visant à mettre en œuvre des politiques cohérentes en la matière, cette composante peut contribuer à améliorer immédiatement de nombreuses méthodes de gestion des données employées dans les SMHN. Cette composante englobe les notions suivantes:

- a) Politique en matière de données, y compris des engagements sur le plan organisationnel, garantissant la viabilité à long terme des CDMS et la propriété intellectuelle;
- b) Diffusion des données;
- c) Données de tiers;
- d) Politique en matière de climatologie;
- e) Gouvernance, y compris à propos des données et des technologies de l'information.

La composante relative à la gestion des données porte sur les fonctionnalités requises pour gérer efficacement les données climatologiques et recouvre les notions suivantes:

- a) Ingestion et extraction des données;
- b) Sauvetage des données;
- c) Contrôle de la qualité des observations;
- d) Évaluation de la qualité;
- e) Gestion des métadonnées climatologiques.

La composante relative à la diffusion des données se réfère aux fonctionnalités requises pour assurer la diffusion des données climatologiques et englobe les notions suivantes:

- a) Recherche des données (données et métadonnées climatologiques);
- b) Diffusion des données dans les formes de présentation de l'OMM;
- c) Diffusion des données fondée sur des normes spatiales ouvertes telles que les normes de l'*Open Geospatial Consortium* (OGC) et de la série 19100 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

La composante relative à l'analyse des données porte sur toute une série de techniques d'analyse qui sont appliquées aux données climatologiques et peuvent donner lieu à la production d'un certain nombre de produits dérivés. Citons quelques exemples:

- a) Une série de techniques, notamment d'analyse statistique et spatiale et d'analyse des images;
- b) Homogénéisation;
- c) Processus de modélisation numérique.

La composante relative à la présentation des données consiste en un ensemble varié de techniques servant à communiquer des informations liées au climat, parmi lesquelles figurent:

- a) Les rapports écrits;
- b) L'exploration des séries chronologiques de données climatologiques par l'intermédiaire d'une interface utilisateur graphique dotée notamment des fonctionnalités suivantes: production d'un large éventail de rapports de veille stratégique, y compris des tableaux, des graphiques, des diagrammes de dispersion, des histogrammes et des ensembles; visualisation de données disparates au moyen, par exemple, de techniques cartographiques, de diagrammes et d'images 3D; réalisation d'une recherche intégrée et d'une exploration dynamique de données et de métadonnées climatologiques disparates au moyen de fonctionnalités telles que les techniques d'intelligence spatiale;
- c) Exploration multimédia des données, par exemple au moyen de balados, de vidéos ou de photographies.

Les composantes relatives à l'infrastructure informatique représentent les fonctionnalités requises à l'appui d'un CDMS. Ces composantes sont des notions abstraites. Une composante particulière peut se référer à plusieurs logiciels et processus qui répondent à une exigence fonctionnelle précise. De la même façon, une application logicielle particulière peut assurer les fonctionnalités décrites dans plusieurs composantes. La fonctionnalité de base des CDMS est la même pour les pays les moins avancés, les pays en développement ou les pays développés. Toutes les composantes ne sont pas requises; la publication intitulée *Climate Data Management*

System Specifications (WMO-No. 1131) aborde la question de savoir si une fonctionnalité est considérée comme requise, recommandée ou facultative et fournit des spécifications détaillées pour toutes les composantes.

3.2.2 Acquisition des données d'un CDMS

Quand elles se présentent sous forme numérique, les données peuvent être directement intégrées dans le système. Dans le cas contraire, elles sont généralement numérisées au cours d'un processus de saisie. Un objectif fondamental du processus de saisie des données consiste à copier, avec un minimum d'erreurs, les données brutes telles qu'elles ont été recueillies initialement. Un système de saisie à touches doit permettre à l'opérateur de saisir les données aisément et avec efficacité. Le système peut aussi être conçu pour valider les données au fur et à mesure de leur saisie et détecter les erreurs éventuelles. Il est aussi possible de définir des valeurs par défaut pour certains éléments, ce qui évite des frappes inutiles.

Quand elles proviennent de SMA, les données climatologiques, y compris les messages d'erreur, sont normalement transmises par voie électronique aux CDMS. Les données issues d'observations manuelles devraient être transmises aux CDMS dans les plus brefs délais par le moyen le plus pratique. Il est préférable de recueillir les données au moins une fois par jour, car leur qualité en sera probablement améliorée, le contrôle manuel de la qualité demandera probablement moins d'effort, les erreurs techniques seront détectées plus rapidement et il y aura beaucoup plus de possibilités d'accéder à davantage de données dans de meilleures conditions. Néanmoins, quand une transmission quotidienne des données se révèle impossible, un envoi mensuel demeure une solution acceptable. À titre d'exemple, parmi les quelque 6 000 observateurs bénévoles australiens, beaucoup continuent d'envoyer chaque mois des relevés pluviométriques qui contiennent les résultats de leurs observations quotidiennes du mois écoulé.

Beaucoup d'observations météorologiques sont enregistrées par d'autres institutions ou organismes que les SMHN, ce qui peut rendre difficile l'acquisition des données sous leur forme originale. Il faut alors s'efforcer d'obtenir des copies des formulaires de transmission de données d'origine. S'il est impossible d'obtenir soit l'original soit une copie des relevés, il y a lieu de l'indiquer dans l'inventaire des données du centre, en précisant l'existence des données en question, le lieu où elles se trouvent, le volume des données disponibles, la période couverte par les relevés, les stations appartenant au réseau, le cas échéant, et les éléments observés.

Bien que cela ne soit pas obligatoire, il est recommandé qu'en plus des données et métadonnées traditionnelles, les CDMS contiennent des informations diffusées par les médias, des photos et autres informations similaires. Il est possible d'enregistrer ce type d'information sous forme d'image numérique tirée d'un article de presse, à l'aide d'un appareil photo numérique ou d'un scanner, avec l'indication de la date, de la région et du type de phénomène (crue, sécheresse, fortes précipitations, etc.), le nom du média et quelques remarques complémentaires sur le phénomène.

Il importe de conserver la valeur d'une donnée initialement reçue ainsi que la dernière valeur découlant du contrôle de la qualité. La valeur d'origine sera probablement soumise à un premier processus de contrôle automatique de la qualité au moment de la saisie, puis, au besoin, à un autre processus de contrôle de la qualité plus poussé; même quand elle est rejetée par l'un ou l'autre de ces processus, il faut toujours la conserver. Certains CDMS conservent non seulement la valeur initiale et la dernière correction, mais aussi toutes les modifications intermédiaires.

L'enregistrement des situations où des données attendues n'ont pas été reçues fait aussi partie de l'acquisition des données. Les pertes de données peuvent être dues, par exemple, à des pannes d'instrument, à des erreurs de transmission de données ou à des erreurs de traitement lors de l'acquisition. Il est possible de reconstituer les données perdues avec différents degrés de certitude. Par exemple, lorsqu'une valeur quantitative des précipitations est manquante et qu'on sait, grâce à d'autres données, qu'il ne pouvait se produire de précipitations compte tenu des conditions locales et synoptiques, on peut alors considérer qu'elle est égale à zéro. Dans d'autres cas, il est possible d'estimer les données perdues avec un degré de certitude acceptable

à l'aide des techniques examinées à la section 5.9. Dans tous les cas, les données obtenues par reconstitution ou estimation devraient être indiquées explicitement dans la documentation portant sur le jeu de données concerné (voir 3.4.1).

3.2.3 Documentation sur les données d'un CDMS

Il faut disposer d'un ensemble approprié de métadonnées pour informer les utilisateurs futurs de la nature des données que contient le système, de la manière dont les différents jeux de données ont été constitués et de tous les problèmes connexes. Concernant la gestion des bases de données, il est recommandé de prendre en compte tous les renseignements qui peuvent avoir une incidence sur l'homogénéité d'un jeu ou d'une série de données, y compris les facteurs décrits dans la section 2.6.9.

Dans un système idéal, la structure des métadonnées serait généralement plus complexe que celle des données. Prenons par exemple le cas d'une observation de la pluie. Elle indique essentiellement la hauteur de précipitation pour une période donnée dans une station donnée. Les métadonnées associées à cette observation et qui pourraient permettre d'en obtenir une interprétation complète pourraient comprendre les renseignements suivants: la date de référence utilisée par la base de données (fuseau horaire, par exemple); des indicateurs de qualité attribués à l'observation; l'historique des modifications apportées aux valeurs et à tout autre indicateur associé; l'instrument utilisé pour enregistrer l'observation, avec des détails sur les programmes de maintenance, les tolérances, les paramètres internes et toute autre information analogue; le nom et les coordonnées de l'observateur; toutes les précisions voulues sur l'emplacement et l'exposition de la station et sur son historique; le programme d'observation en vigueur et son historique; et des informations détaillées sur la topographie et la couverture du sol propres à la station. Le traitement des métadonnées propres à chaque station est décrit en détail dans la publication intitulée *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186), 2.1 à 2.5. De la même manière, les métadonnées associées à un jeu de données aux points de grille issues d'observations à haute résolution du rayonnement solaire par satellite devraient comprendre les indications suivantes: l'étendue géographique des observations, la période de relevé du jeu de données, l'historique des révisions apportées au jeu de données et des activités de maintenance, les satellites qui ont fourni les données, les fonctions de transfert et les méthodes de calcul des moyennes ayant servi à obtenir les valeurs aux points de grille, le degré d'exactitude du positionnement des satellites, des informations sur l'exactitude des données et les coordonnées d'un correspondant.

Les métadonnées doivent aussi porter sur le CDMS lui-même. Tous les processus propres au système devraient être décrits de façon exhaustive (saisie, contrôle de la qualité, etc.). L'historique de toutes les modifications apportées aux divers éléments du système (logiciel, matériel, procédures manuelles, etc.) devrait y figurer et être tenu à jour. Étant donné que les pratiques d'observation, les techniques de contrôle de la qualité et les procédures de manipulation des données évoluent, ces métadonnées sont indispensables pour l'analyse climatologique des données chronologiques. L'analyste se sert des métadonnées pour déterminer et comprendre comment la valeur d'une donnée a été obtenue et traitée afin de soustraire les relevés à d'éventuelles influences non météorologiques.

L'inventaire des données que contient un CDMS constitue une autre catégorie de métadonnées, et il convient de le tenir régulièrement à jour. Une stratification pourrait par exemple s'effectuer par élément de donnée, par emplacement de station ou par heure d'observation. Il convient d'établir et de tenir à jour des listes de contenu décrivant et définissant les données présentes dans chaque fichier et donnant des indications sur les codes et les pratiques d'observation employés. Il importe de savoir ce que contient un CDMS pour pouvoir en extraire efficacement de l'information. Il y a lieu d'utiliser le profil de base OMM de la série de normes ISO 19100 concernant les données et les métadonnées, à moins que d'autres normes sur les métadonnées climatologiques aient été publiées pour les remplacer.

3.2.4 Stockage des données d'un CDMS

L'une des principales fonctions de l'administrateur de données consiste à évaluer les besoins en stockage de données ainsi que leur évolution. Il doit tenir compte des informations complémentaires à faire figurer dans les relevés de données (indicateurs de qualité des données, messages initiaux et date et heure de mise à jour des relevés, par exemple), des besoins en métadonnées et de toute redondance nécessaire pour que les bases de données puissent être correctement récupérées. Certains types de données (telles que les données de télédétection, les données océanographiques ou les données de SMA à grande résolution temporelle) représentent des volumes importants à stocker.

Pour certaines formes de données nouvelles (comme l'humidité du sol, les observations phénologiques ou les indices de végétation), les besoins en matière de stockage peuvent varier par rapport aux données issues d'observations plus classiques. Les SMA fournissent souvent des données qui ont une importance pour la qualité des observations, mais qui ne sont pas des données climatologiques proprement dites (par exemple des indications sur la tension des batteries d'une SMA). En règle générale, les renseignements de ce type devraient être utilisés avant l'archivage des données; si elles ne figurent pas dans le CDMS, il convient de les conserver de façon permanente dans un autre lieu en veillant à ce qu'elles demeurent à la disposition des administrateurs de données. Le processus de contrôle de la qualité engendre souvent des valeurs et des informations qui peuvent différer des données initiales; aussi faut-il prévoir suffisamment d'espace de stockage à la fois pour les données initiales et pour les données découlant des processus de contrôle de la qualité.

Il peut se révéler très difficile d'évaluer les besoins futurs, car il est compliqué de déterminer les types de données dont on pourra disposer à l'avenir en fonction des progrès technologiques. Il incombe aux administrateurs de données de prendre en compte tous ces facteurs pour déterminer les besoins en stockage.

Tous les relevés autres que numériques devraient être stockés de manière à éviter autant que possible qu'ils se détériorent. Ils devraient être conservés dans un milieu contrôlé pour éviter les destructions potentielles causées par les extrêmes de température et d'humidité, les insectes, les parasites, les incendies, les inondations, les accidents ou les actes de vandalisme. Le mieux serait de les stocker dans des contenants non acides placés dans des salles climatisées et sécurisées réservées à cet effet. Il faudrait aussi mettre en place un programme de maintenance pour le sauvetage des documents qui se détériorent et, en particulier, des données qu'ils contiennent.

Comme la quantité de données produites et conservées ne cesse d'augmenter, le problème se pose de savoir s'il faut ou non continuer de stocker tous les relevés sous leur forme manuscrite d'origine. Bien trop souvent, les relevés climatologiques sont conservés en sous-sol, dans des remises ou dans d'autres lieux peu adaptés. Souvent aussi, ils ne sont pas inventoriés dans un catalogue et peuvent être inaccessibles ou sujets à détérioration. Afin de diminuer les achats de papier, de mieux utiliser l'espace et de sécuriser le contenu des documents d'origine, il est recommandé de numériser les données manuscrites sous forme de fichiers numériques et de les conserver avec soin. Les caractéristiques du matériel informatique nécessaire au stockage et à l'extraction des documents sont fonction des besoins en données, des ressources financières disponibles ainsi que des progrès technologiques; il n'y a donc pas de normes mondiales en la matière, et l'on ne peut recommander un support de stockage plutôt qu'un autre. Il importe de ne pas oublier qu'aucun support de stockage ne dispose d'une durée de vie illimitée et qu'il faut donc revoir régulièrement les dispositions en matière d'archivage. Aussi faut-il prendre des mesures pour garantir une sauvegarde régulière des archives informatiques, une copie au moins des données étant stockée ailleurs que dans les archives principales.

On entend par microformes des documents images réduits par procédé photographique à une très petite fraction de leur taille d'origine. Il existe différentes formes de présentation des microformes, dont les bobines de microfilms, les feuilles de microfiches, les jaquettes de microfilms, les folios de films, les cartes à fenêtre, les cartouches et les cassettes. Cependant, compte tenu des progrès importants accomplis en matière de stockage numérique, il est

préférable à présent de numériser directement les documents papier, mais aussi les images sur microformes périmées, à l'aide d'un scanner ou d'un appareil photo numérique. Ce processus facilite l'accès aux données et en garantit la préservation pour les générations futures.

3.2.5 Accès aux données et extraction des données d'un CDMS

La puissance des fonctions d'extraction et d'analyse des données est l'un des aspects importants des CDMS. Pour répondre aux besoins d'extraction de données de la majorité des utilisateurs, il suffira d'une interface graphique. Une interface en ligne de commande devrait être réservée au petit nombre d'utilisateurs plus avertis qui ont besoin d'exécuter des extractions sortant de l'ordinaire. Les utilisateurs devraient avoir la possibilité de spécifier leurs propres critères d'extraction; la documentation du système devrait être explicite et fournir tous les renseignements dont les utilisateurs ont besoin.

Le système devrait proposer un large éventail d'options pour personnaliser les résultats des extractions, notamment en ce qui concerne les stations, les horaires et les détails de présentation. Les utilisateurs devraient ainsi avoir accès à des listes de données, à des résumés tabulaires, à des analyses statistiques et à des présentations graphiques.

3.2.6 Archives d'un CDMS

Les archives constituent la partie des CDMS destinée à la conservation à long terme et, dans certains cas, permanente des données et des métadonnées. Quelle soit simple ou complexe, physique ou électronique, la structure des archives est fonction de différents facteurs: les ressources financières disponibles, le degré de qualification des archivistes, le volume des données à archiver, le support des données (documents papier ou forme de présentation numérique), la facilité d'introduire des données dans les archives puis d'en extraire l'information requise, le caractère convivial de l'accès à l'information, la facilité de maintenance des archives et la facilité d'augmenter le volume des archives au fur et à mesure que les données affluent. Il convient d'archiver tous les éléments constituant le CDMS, c'est-à-dire, outre les valeurs de donnée elles-mêmes, les catalogues, les inventaires, les historiques, les dictionnaires et les informations analogues.

3.2.7 Sécurité d'un CDMS

Les principes de sécurité applicables et les activités qui s'y rattachent ont pour principal objectif d'éviter la perte ou la détérioration du CDMS. Pour ce faire, les conditions à remplir sont les suivantes:

- a) L'ensemble des membres du personnel doivent avoir connaissance de leurs responsabilités professionnelles;
- b) Les archives et l'environnement des bases de données doivent être sécurisés et protégés contre des dangers physiques tels que l'incendie ou l'excès d'humidité;
- c) Pour les données numériques, il y a lieu d'assurer la sécurité de la base de données et ses composantes au niveau de l'utilisateur. Seul un petit groupe de personnes agréées devrait avoir le droit de manipuler les données (insertion, mise à jour ou suppression);
- d) Les personnes bénéficiant de l'accès en écriture à la base de données doivent s'engager à ne procéder à aucune opération en dehors des activités et pratiques approuvées par l'administrateur de données;
- e) Toute modification apportée aux tableaux de données doit faire l'objet d'une trace d'audit de sécurité dont l'accès devrait être réglementé;

- f) Certains principes de sécurité devraient s'appliquer aux mots de passe: par exemple, il ne faut ni les communiquer ni les noter sur papier, ils doivent être changés régulièrement, ils doivent être composés de lettres, de chiffres et de caractères n'ayant apparemment aucun lien entre eux;
- g) Tous les services annexes devraient être désactivés sur l'ordinateur donnant accès à la base de données;
- h) La base de données doit être protégée contre les virus et les actes de piratage;
- i) Il importe d'exécuter fréquemment des sauvegardes car, en cas de panne de l'ordinateur, tout le travail réalisé depuis la dernière sauvegarde sera probablement perdu et il faudra le recommencer. En principe, des sauvegardes incrémentielles devraient être effectuées tous les jours et des sauvegardes complètes, une fois par semaine;
- j) Il y a lieu aussi d'exécuter de façon moins fréquente (généralement une fois par mois) une sauvegarde complète des tableaux de données qui sera placée en un lieu sûr et à l'épreuve des incendies, éloigné du lieu où se trouve physiquement la base de données climatologiques. Il est courant de disposer de trois exemplaires des mêmes archives dans trois lieux sûrs différents, si possible dans des villes différentes;
- k) Avant toute modification du logiciel d'un CDMS, de sa structure ou des applications qu'il contient, il faut exécuter des sauvegardes du système.

3.2.8 **Gestion d'un CDMS**

Un CDMS doit être soumis à un contrôle régulier, destiné à déterminer dans quelle mesure les processus d'exploitation de la base de données remplissent leur rôle. Ces processus comprennent notamment la maintenance des métadonnées, l'entrée de données dans la base, les mesures de contrôle de la qualité qui modifient la base et l'extraction de l'information. Il convient de contrôler chaque processus, de l'analyser et de l'améliorer au besoin. Il est vivement recommandé aux administrateurs de données de bien considérer la gestion des données comme un processus de bout en bout et de communiquer aux responsables des observations l'information au sujet des problèmes systémiques relatifs à la qualité des données, des pertes de données ou encore des pratiques ayant un effet néfaste sur les relevés climatologiques, pour que ceux-ci puissent y remédier.

Dans les rapports de surveillance figurent généralement le numéro et le type des stations prises en compte dans la base de données, la quantité de données conservées dans la base, réparties par station et par type d'élément d'observation, et des informations sur les données manquantes. Il est possible de comparer ces informations aux programmes d'observation pour déterminer quand et où les données ont été perdues. D'autres rapports pourraient indiquer les mesures de contrôle de la qualité à mettre en œuvre pour veiller à ce que ce contrôle soit bien en phase avec le flux de nouvelles données et pour recenser tout groupe de données présentant des problèmes de qualité d'une ampleur excessive. Il est utile de contrôler de près la quantité et l'étendue des données extraites pour répondre aux demandes des utilisateurs, car cela permet de savoir quels sont les jeux de données les plus importants et quels sont les domaines à développer à l'avenir.

La fréquence des rapports de surveillance ainsi que la période consacrée à leur établissement sont fonction des besoins des SMHN. S'agissant de l'assimilation des données, des rapports peuvent être produits automatiquement, éventuellement chaque jour. Des rapports mensuels sur la quantité et la qualité des données correspondent en général au cycle mesuel de nombreux produits climatologiques.

3.2.9 **Normes et directives internationales relatives aux CDMS**

On ne peut parler de structure optimale commune aux bases de données climatologiques, étant donné que chaque système est conçu en fonction des besoins spécifiques d'un SMHN et de ses

partenaires. Selon les cas, on peut favoriser l'accès à l'ensemble des données pour un élément précis dans une région donnée et à une certaine heure, mais on peut aussi privilégier l'accès à une série chronologique pour le même élément en un lieu précis. Les besoins particuliers auront une forte incidence sur l'espace de stockage requis ou le temps de réponse nécessaire pour charger des données ou y avoir accès. Les principes généraux qui devraient être appliqués quelle que soit la conception du système sont notamment les suivants:

- a) Documentation à l'intention des utilisateurs: Il convient de disposer de manuels offrant une vue d'ensemble de la base de données et des instructions pour son installation, avec des informations détaillées pour les utilisateurs, les administrateurs du système et les programmeurs;
- b) Saisie des données: Les formulaires de saisie des données devraient avoir, à l'écran, la même présentation que les formulaires sur papier à partir desquels les données sont copiées; il devrait être possible de personnaliser la présentation de ces formulaires; les procédures de saisie des données dans la base devraient correspondre aux besoins du SMHN; les données devraient être validées automatiquement (valeurs acceptables ou indicatifs de stations, par exemple) au cours du processus de saisie; et les valeurs par défaut devraient être saisies automatiquement;
- c) Assimilation des données numériques: Le système devrait pouvoir assimiler automatiquement les données au format standard qui sont transmises par l'intermédiaire du Système mondial de télécommunications (SMT), les fichiers contenant les données de plusieurs stations, les fichiers multiples contenant les données d'une seule station, les données provenant des SMA, les données présentées suivant des formats définis par les utilisateurs et les métadonnées;
- d) Validation et contrôle de la qualité: Le système devrait comporter une série d'indicateurs pour les éléments suivants: la source des données, le type d'assurance de la qualité appliqué (notamment au cours du processus de saisie ou du traitement en fin de mois), les résultats de l'assurance de la qualité et la raison justifiant la décision d'accepter ou de rejeter une valeur ou de fournir une valeur estimative. Il devrait conserver les valeurs initiales, estimées et modifiées des données; il devrait aussi procéder à une évaluation spatiale et temporelle des données pour ce qui concerne les valeurs autorisées, la cohérence météorologique et la vraisemblance physique;
- e) Documentation technique: La liste définissant chaque tableau et les relations entre les tableaux doit être dressée; les conventions en matière de désignation doivent être cohérentes pour l'ensemble des tableaux, des index, des entités et des vues;
- f) Accès aux données: L'interface entre l'utilisateur et la base de données devrait être facile à utiliser; elle devrait fournir à l'utilisateur des indications explicites et des exemples au sujet des procédures d'extraction de l'information dont il a besoin;
- g) Métadonnées: Le système doit pouvoir gérer toute la gamme des métadonnées (voir la description à la section 2.6.9);
- h) Produits élaborés: Les CDMS devraient pouvoir élaborer des produits standard qui répondent aux besoins des SMHN, notamment des listes de données et des tableaux de données horaires, quotidiennes, mensuelles et relatives à des périodes plus longues; des résumés statistiques; et des graphiques descriptifs, notamment des analyses d'isohypes, des roses des vents, des séries chronologiques, des sondages en altitude et des modèles de pointage;
- i) Administration des données et du système: Il devrait être possible de réaliser régulièrement et à la demande une sauvegarde du système sans avoir à interrompre son fonctionnement; de restaurer rapidement le système en cas de besoin; d'enregistrer les transactions individuelles; d'assurer la sécurité du système; de surveiller les performances du système

(par exemple l'utilisation de la mémoire, l'espace de stockage disponible, le nombre des transactions et l'état des journaux système); et d'en effectuer régulièrement une copie en un lieu distinct;

- j) Niveau d'assistance: Les utilisateurs devraient pouvoir résoudre les problèmes à l'aide de la documentation fournie, communiquer avec d'autres utilisateurs pour échanger questions et remarques et obtenir rapidement, au besoin, des conseils auprès des concepteurs du système;
- k) Souplesse: Le système devrait pouvoir être élargi et modifié au fur et à mesure que les technologies propres au matériel et au logiciel progressent, que les sources de données changent et que les besoins en produits augmentent.

3.3 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Le contrôle de la qualité a pour objectif de vérifier si une donnée transmise est bien représentative de ce qui devait être mesuré et si elle n'a pas été contaminée par des facteurs indépendants. Il importe donc d'établir clairement, dès le départ, ce que les relevés d'une série de données particulière sont censés représenter. Les données ne sont jugées satisfaisantes à des fins d'archivage permanent qu'une fois qu'elles ont subi un contrôle de la qualité approprié.

Le contrôle de la qualité relève aussi de la responsabilité de l'observateur ou du système automatique d'observation, qui devraient s'assurer que l'heure et l'indicatif de la station sont corrects, que les valeurs enregistrées correspondent bien aux conditions présentes et qu'il y a une cohérence adéquate entre les différents éléments observés. Toutes ces vérifications doivent être effectuées avant l'enregistrement ou la transmission des données d'observation.

Les données d'observation reçues devraient être également soumises à un contrôle de la qualité au centre d'archivage. Quand les documents sources sont des relevés manuscrits, dès réception au centre d'archivage, des membres du personnel qualifiés devraient inspecter les données avant qu'elles soient numérisées. Il convient d'examiner les formulaires pour vérifier si les relevés sont bien identifiés (par exemple nom, indicatif et emplacement de la station), s'ils sont lisibles et s'ils ont bien été transcrits (par exemple avec la précision voulue et dans les bonnes colonnes). Si une erreur est détectée, il faut communiquer avec la station d'observation pour obtenir une explication ou pour corriger le problème. Si, par manque de ressources, il est impossible de réaliser le contrôle de la qualité de toutes les données, il faut accorder la priorité aux éléments climatiques les plus importants.

Les procédures de contrôle de la qualité des données météorologiques permettent de s'assurer des niveaux de qualité définis de ces données tout au long de leur cycle de vie et devraient faire partie intégrante de tout système de gestion de la qualité. Il faut noter que les procédures servent en particulier à s'assurer des niveaux de qualité des données destinées aux applications et services climatologiques. Il faut aussi noter que les procédures de contrôle de la qualité doivent être adaptées aux conditions climatiques particulières à chaque pays et ajustées dans le détail afin de correspondre au mieux à l'infrastructure actuelle et prévue en matière d'observation et de technologies de l'information ainsi qu'aux ressources humaines disponibles. Les procédures de contrôle de la qualité appliquées devraient faire l'objet d'une documentation appropriée et être mises à la disposition des utilisateurs des données. On trouvera des directives détaillées sur l'assurance qualité des données d'observation en surface destinées aux applications climatologiques dans la prochaine version de la publication intitulée *Guidelines on the Quality Control of Surface Climatological Data* (WMO/TD-No. 111). La nouvelle publication comprendra un certain nombre de tests qui complèteront l'information donnée aux sections 3.4.3 à 3.4.7 ci-dessous.

3.3.1 Procédures de contrôle de la qualité

Lorsque les données d'observation se présentent sous forme numérique, le centre d'archivage devrait les soumettre de façon régulière et systématique à un contrôle de la qualité complet et approfondi. Un programme informatique peut examiner toutes les données et établir la liste de celles qui échouent à une série bien définie de tests, sans pour autant parvenir à déterminer le problème sous-jacent. En revanche, un analyste compétent réussira souvent à déceler la cause des erreurs et à définir les corrections qu'il conviendrait d'appliquer, mais sera généralement dépassé par la vaste quantité des données à traiter. La meilleure technique consiste à combiner les deux méthodes: un ordinateur établit la liste des erreurs éventuelles qu'un analyste examine pour déterminer les mesures à prendre.

Les techniques statistiques (décrisées dans les chapitres 4 et 5) sont d'une grande utilité pour détecter les erreurs et, dans certains cas, proposer ce que devrait être la «bonne» valeur. Pour valider de grandes quantités de données, il est indispensable de mettre en place un filtrage objectif et automatisé. Une vérification manuelle du résultat du filtrage devra cependant être effectuée pour s'assurer que les procédures automatiques fonctionnent comme prévu. L'affichage des données sur des cartes ou des graphiques ou encore des résumés de données se révèlent particulièrement utiles pour faciliter l'examen visuel. Les techniques statistiques intègrent et assimilent de grandes quantités de données et font apparaître des schémas dont un analyste qualifié se servira pour évaluer la vraisemblance physique, déceler les valeurs aberrantes, signaler les données suspectes et évaluer les performances des procédures automatiques.

Un indicateur approprié devrait être attribué à chaque observation. Il y a lieu d'introduire dans la base de données les corrections ou les données estimées correctes et d'y conserver aussi les données initiales. Une fois que la qualité des données a été contrôlée et que les corrections et modifications voulues ont été apportées, il convient de soumettre une fois encore le jeu de données obtenu aux vérifications du contrôle de la qualité. Cette dernière étape permet de garantir que des erreurs n'ont pas été introduites au cours des procédures de contrôle de la qualité. La vérification manuelle doit permettre aussi de déceler des schémas d'erreurs pouvant résulter, par exemple, d'erreurs logicielles, d'une mauvaise application des instructions ou des procédures ou encore de procédures ou instructions inappropriées. Il convient de communiquer les schémas en question aux responsables du programme d'observation du SMHN.

Une base de données donne en général accès à une même donnée à différents stades du contrôle de la qualité. La donnée initiale, telle qu'elle a été reçue dans la base, doit être conservée, mais les processus de validation entraînent souvent des modifications de cette donnée. Des indicateurs de qualité permettent de signaler ces différents stades. Il serait possible d'en utiliser une multitude, mais il vaut mieux se servir du nombre minimum suffisant pour décrire l'évaluation de la qualité et la fiabilité des données brutes ou des valeurs estimées. Pour répondre à la plupart des besoins, il suffit d'un code à deux chiffres pour l'indicateur de qualité: un chiffre pour le type des données et l'autre pour le stade de la validation. Quand les données proviennent de plusieurs sources, un troisième chiffre correspondant à la source se révèle souvent utile. Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 fournissent des exemples de «types de données», de «stades de validation» et de «méthodes d'acquisition».

Tableau 3.1. Exemple de code correspondant à divers types de données

Code correspondant au type de donnée	Signification
0	Donnée initiale
1	Donnée corrigée
2	Donnée reconstituée (par interpolation, estimation, désagrégation, etc.)
3	Valeur calculée

Tableau 3.2. Exemple de codes pour les indicateurs de stade de validation

<i>Code correspondant au stade de validation</i>	<i>Signification</i>
1	Donnée manquante (donnée non reçue ou observation non réalisée)
2	Donnée éliminée une fois le contrôle de la qualité terminé
3	Donnée non vérifiée (donnée venant d'être introduite ou donnée historique n'étant soumise à aucun contrôle de la qualité)
4	Donnée déclarée douteuse, car signalée comme donnée aberrante par les vérifications préliminaires, en attente d'un contrôle plus poussé (possibilité d'erreur)
5	Donnée déclarée douteuse après contrôle automatique ou vérification manuelle (probabilité d'erreur)
6	Donnée déclarée validée après contrôle automatique ou vérification manuelle (mais une modification ultérieure reste possible, par exemple si une étude révèle que la donnée peut encore être améliorée)
7	Donnée validée après contrôle automatique et vérification manuelle, sans modification ultérieure possible

Tableau 3.3. Exemple de code pour les indicateurs de méthode d'acquisition des données

<i>Code correspondant à la méthode d'acquisition</i>	<i>Signification</i>
1	Système mondial de télécommunications
2	Saisie
3	Réseau de télécommunications des stations météorologiques automatiques
4	Fichier numérique de station météorologique automatique
5	Relevé manuscrit

3.3.2 Documentation sur le contrôle de la qualité

Il convient de décrire précisément les procédures et algorithmes du contrôle de la qualité appliqués à chaque stade du traitement des données, de l'observation à l'archivage. Toutes les vérifications effectuées nécessitent une documentation: celles exécutées par l'observateur, la validation initiale au centre de collecte, la validation finale, le contrôle de la qualité après modification des formes de présentation pour les besoins de l'archivage ou de la publication ou encore les vérifications portant sur les résumés de données.

Les utilisateurs des données devraient avoir accès aux relevés détaillés ainsi qu'à la documentation. La connaissance des procédures de traitement et de contrôle de la qualité des données leur permet en effet d'évaluer la validité des observations. Grâce à la documentation appropriée et aux données d'origine conservées dans la base, les futurs utilisateurs pourront évaluer l'incidence des modifications de procédures sur la validité, la continuité ou l'homogénéité des relevés, appliquer de nouvelles connaissances en sciences de l'atmosphère aux anciennes données, voire valider de nouveau les données en fonction des nouvelles techniques et découvertes.

3.3.3 Types d'erreur

Les erreurs portant sur les métadonnées se traduisent souvent par des erreurs de données. Par exemple, si l'indicatif de la station est inexact, on pourra comprendre que la donnée provient d'un autre endroit, ou si la date est incorrecte, on pourra penser que la donnée provient d'une observation exécutée à une heure différente. Les tests de complétude des données feront

apparaître les données manquantes pour un lieu et une heure en particulier, tandis que les tests de cohérence et de dispersion permettront de déceler les données attribuées de façon inexacte à un lieu et à une heure donnés.

Les erreurs de données découlent principalement d'erreurs instrumentales, d'erreurs commises par l'observateur, d'erreurs de transmission, d'erreurs de saisie, d'erreurs de validation, ainsi que de modifications de formes de présentation et de problèmes de réduction des données. Pour établir un ensemble de procédures de contrôle de la qualité, il convient de prendre en compte tous les types possibles d'erreurs, leurs sources et leurs causes et de s'efforcer de les réduire. En ce qui concerne la mise au point de procédures automatiques ou semi-automatiques visant à attribuer des indicateurs d'erreurs aux données, il est recommandé aux concepteurs de travailler en étroite collaboration avec le personnel chargé du contrôle opérationnel de la qualité.

3.3.4 Tests des formes de présentation

Il y a lieu de vérifier les répétitions d'observations ou l'utilisation erronée de formes de présentation, notamment des caractères alphanumériques dans un champ numérique, des champs insérés par erreur ou des champs vides dans une observation, des codes d'identification impossibles et des dates impossibles. Les erreurs de forme de présentation peuvent être causées par une erreur de saisie, par la dégradation du signal de transmission d'un message ou par une erreur faite par un opérateur.

Il convient de mettre en place des procédures visant à éliminer et au moins à réduire les erreurs de forme de présentation. Deux méthodes sont couramment employées pour réduire les erreurs de saisie, à savoir la double saisie (la même donnée étant saisie indépendamment par deux opérateurs) et les algorithmes de détection d'erreur. Le choix entre ces deux méthodes sera fonction de la compétence du personnel chargé de la saisie, de la complexité des observations et des ressources disponibles. Il convient d'utiliser des techniques numériques de détection et de correction des erreurs pour éliminer ou au moins déceler les erreurs de transmission. C'est en soignant la conception des systèmes de saisie que l'on peut réduire le plus possible les erreurs imputables aux opérateurs; cela étant, quel que soit le degré de convivialité du système utilisé, il demeure nécessaire de bien former les opérateurs et d'exécuter des vérifications de performance.

3.3.5 Tests de complétude

Quand des données sont manquantes, cela peut avoir une importance cruciale suivant le type d'élément observé. Dans le cas d'extrêmes mensuels ou de données portant sur des phénomènes tels que le nombre de jours où la hauteur de précipitation est supérieure à un certain seuil, le fait que des données quotidiennes soient manquantes introduit une incertitude non négligeable quant aux valeurs enregistrées. Des hauteurs totales mensuelles de pluie peuvent être fortement mises en doute s'il manque quelques jours de données, en particulier si cela correspond à une période de pluie. L'incidence de données manquantes sera moindre cependant sur la valeur de la température moyenne mensuelle que dans les deux exemples cités précédemment. Pour certaines applications, il est absolument nécessaire que les données soient complètes.

Il convient de classer les données par type d'observation dans un ordre chronologique prédéterminé, par station. L'inventaire des données devrait être comparé à un fichier principal des indicatifs de stations. Il y a lieu de comparer aussi les observations reçues avec les observations que l'on prévoit de recevoir. L'absence de toute observation prévue doit être indiquée pour examen ultérieur.

3.3.6 Tests de cohérence

Pour ce type d'épreuve de validité, on distingue quatre sortes de cohérence: la cohérence interne, la cohérence temporelle, la cohérence spatiale et la cohérence des résumés de données. Des relations dans le temps et l'espace pouvant être établies entre les différentes valeurs, il y

a lieu de mettre au point une procédure intégrée pour examiner leur cohérence. Par ailleurs, il convient d'établir une documentation complète sur les tests de cohérence, mentionnant les procédures, les formules et les critères de décision.

La cohérence interne se fonde sur des relations physiques entre les éléments climatologiques. Il convient de vérifier avec soin tous les éléments par rapport aux éléments connexes d'une même observation. Par exemple, il faut contrôler les données psychrométriques pour s'assurer que la température du thermomètre sec est égale ou supérieure à la température du thermomètre mouillé. De même, il faut vérifier la vraisemblance de la relation entre la visibilité et le temps présent pour s'assurer que les pratiques normalisées d'observation sont bien appliquées.

Il convient de vérifier aussi que les données correspondent bien à leur définition. Par exemple, la valeur maximale doit être égale ou supérieure à la valeur minimale. D'autres vérifications de cohérence interne se fondent sur des limites physiques. La durée d'insolation par exemple se limite à la durée de la journée, le rayonnement global ne peut être plus grand que l'éclairement énergétique au sommet de l'atmosphère, la direction du vent doit se situer entre 0° et 360° et les hauteurs de précipitation ne peuvent être négatives.

La cohérence temporelle vérifie la variation d'un élément dans le temps. Beaucoup de jeux de données climatologiques se distinguent par une autocorrélation importante. On peut donc vérifier les relevés en les comparant aux observations précédentes et suivantes. En se fondant sur leur expérience ou sur des méthodes analytiques ou statistiques, les vérificateurs peuvent déterminer les variations auxquelles on peut s'attendre pour un élément donné sur une période quelconque. La variation est généralement fonction de l'élément, de la saison, du lieu et de l'intervalle de temps écoulé entre deux observations successives. On pourra par exemple mettre en doute une baisse de la température de 10 °C en une heure, bien que cela soit fort réaliste dans le cas du passage d'un front froid ou de l'apparition d'une brise de mer. Il faudra alors comparer la valeur douteuse au temps présent, voire à d'autres types d'observations (la direction du vent, des données de satellites ou des données radar, ou encore des données sur la détection de la foudre), avant de prendre la décision de la valider ou de la modifier. Pour certains éléments, une absence de variation peut indiquer une erreur. Une série de vitesses du vent identiques peut par exemple indiquer un problème d'anémomètre.

Il est relativement aisé d'automatiser les tests de cohérence temporelle. Dans la section 5.5 sont décrites des techniques d'analyse de séries chronologiques qu'il est possible d'adapter pour les besoins du contrôle de la qualité. La représentation graphique des données est aussi un excellent moyen de vérification. Plusieurs éléments devraient être visualisés simultanément pour faciliter le diagnostic. Il sera par exemple plus facile de valider une chute de température si l'on dispose aussi de l'information montrant des vents dextrogyres associés au passage d'un front froid ou de fortes pluies associées à un orage.

Pour vérifier la cohérence spatiale, on compare chaque observation aux observations exécutées à la même heure dans d'autres stations de la région. Il est possible de comparer chaque observation à la valeur à laquelle on peut s'attendre pour une station en fonction des observations provenant des stations voisines. Il convient ensuite de repérer les données qui présentent une différence importante entre la valeur attendue et la valeur enregistrée pour qu'elles soient examinées, corrigées ou éliminées au besoin. Il ne faudra pas oublier qu'une comparaison directe ne peut porter que sur des variables identiques, notamment des vitesses du vent mesurées à la même hauteur; des valeurs mesurées à la même hauteur sur un terrain plat et dégagé par exemple; ou des valeurs mesurées dans une région au climat homogène. Des informations détaillées sont fournies dans la section 5.9 au sujet des techniques d'estimation des données dont on a besoin pour ce type de contrôle de la qualité.

Les tests de cohérence des résumés de données figurent parmi les plus faciles à réaliser. En comparant différents résumés de données, il est possible de déceler les erreurs portant sur des valeurs individuelles ou sur un résumé. Par exemple, la somme et les moyennes des valeurs quotidiennes peuvent être calculées pour différentes périodes (une semaine, un mois, une année). Dans le cas d'un élément comme la hauteur de pluie dont la mesure représente un cumul, il suffit d'effectuer un recouplement entre la somme des douze mois et la somme de toutes les valeurs quotidiennes enregistrées au cours de l'année correspondante pour déceler une

erreur. Il est possible parfois de déceler des erreurs systématiques dans les données de stations d'observation en altitude en comparant les moyennes mensuelles avec les moyennes dérivées d'un système d'analyse numérique pour le même lieu et la même altitude. Il convient d'examiner la cause de toute incohérence et de la corriger.

Il est possible en général de soumettre les observations maritimes aux procédures de vérification employées pour les données provenant de stations terrestres d'observation en surface, en modifiant légèrement ces procédures pour les adapter aux éléments supplémentaires, à condition que chaque observation comprenne l'indicatif du navire pour qu'il soit possible de classer les données par navire et dans l'ordre chronologique. Les observations en altitude doivent être vérifiées de manière quelque peu différente. Des recouplements devraient être réalisés, portant sur les conditions en surface, avec les observations exécutées dans une station de surface peu éloignée ou située au même endroit. Un programme de contrôle de la qualité des données en altitude devra vérifier les données de chaque niveau successif par des calculs prenant pour base les données du niveau précédent en commençant par les données en surface. Il convient pour cela de fixer des écarts limites à ne pas dépasser entre les valeurs calculées et les valeurs enregistrées. Tout niveau dont les éléments enregistrés échouent au test de cohérence doit être signalé comme douteux, analysé et corrigé au besoin.

3.3.7 Tests de dispersion

Ces vérifications établissent des limites supérieures et inférieures pour les valeurs possibles d'un élément climatologique (notamment la direction du vent, la nébulosité, le temps passé et le temps présent) ou encore, quand l'intervalle théorique des valeurs possibles est infini, les limites au-delà desquelles les données mesurées ne devraient pas se situer. Dans ce dernier cas, les limites sont habituellement établies, en fonction de l'heure et de l'emplacement, par rapport aux valeurs historiques ou par des méthodes d'interpolation spatiale. Il importe aussi de déceler les erreurs systématiques produites par les instruments et de les corriger rapidement. Il faut tenir à jour les documents dans lesquels sont consignés les tests que subissent les données, les valeurs des limites climatologiques établies pour chaque élément vérifié et la logique ayant conduit à fixer ces limites.

D'une manière générale, les tests de dispersion permettent de comparer une donnée avec une valeur étalon en fonction d'un seuil. Comparer une valeur observée à la valeur extrême ou à la valeur record ou encore à un multiple des écarts-types autour de la moyenne arithmétique des valeurs pour cette date constitue un test de dispersion simple à réaliser. Dans ce dernier cas, il faut tenir compte du fait que, pour certains éléments, la distribution des valeurs n'est pas symétrique ou gaussienne et que certaines valeurs extrêmes déterminées à l'aide d'un multiple de l'écart-type peuvent être incorrectes.

Si le contrôle de la qualité porte sur des séries chronologiques de données de longue durée, il est préférable d'employer une référence normalisée (des écarts-types ou un classement par ordre de grandeur non paramétrique) plutôt qu'une référence absolue. Dans la section 4.4, on examine divers descripteurs utilisés pour résumer les données, y compris les restrictions quant à leur adéquation.

Il peut être possible de réaliser certains tests de dispersion à l'aide de flux de données complètement différents, notamment des données de satellite ou des données radar. Un test très simple, par exemple, consiste à vérifier si des précipitations se sont produites ou non en s'assurant de la présence de nuages sur une image satellitaire.

3.4 ÉCHANGE DE DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

L'échange de données est essentiel à la climatologie. Pour les Membres de l'OMM, l'obligation de partager données et métadonnées entre eux et les conditions de transmission de celles-ci à des tiers sont stipulées dans la résolution 60 du Dix-septième Congrès météorologique mondial (Cadre mondial pour les services climatologiques), dans la résolution 25 du Treizième

Congrès météorologique mondial (données hydrologiques), dans la résolution 40 du Douzième Congrès météorologique mondial (données météorologiques) et dans la résolution XXII-6 de la Commission océanographique intergouvernementale (données océanographiques). Ces résolutions intègrent les notions de données «essentielles» et «supplémentaires» et définissent le jeu de données minimum à mettre à disposition sans rétribution ni discrimination aucunes, sans rétribution signifiant que seuls les frais de reproduction et d'expédition sont facturés, à l'exclusion des données et des produits eux-mêmes. Les Membres peuvent décider de déclarer «essentielles» un plus grand nombre de données que ce jeu minimum. Dans le cadre de l'échange de données, il est essentiel d'utiliser des formes de présentation normalisées reconnues à l'échelle internationale.

Outre les messages CLIMAT et connexes (voir 4.8), il est aussi demandé aux Membres de fournir les données et produits supplémentaires nécessaires pour appuyer les programmes de l'OMM à l'échelle mondiale, régionale et nationale et pour aider d'autres Membres à fournir des services météorologiques et climatologiques dans leur pays. Les Membres qui fournissent ces données et produits supplémentaires peuvent en soumettre la réexportation à certaines conditions. Les Membres devraient mettre gratuitement et sans restriction, à la disposition des chercheurs et des enseignants pour leurs activités non commerciales, toutes les données et tous les produits échangés sous les auspices de l'OMM.

Les Membres de l'OMM acceptent qu'une partie de leurs stations appartiennent à des réseaux comme le Réseau de stations d'observation en altitude pour le SMOC (GUAN), le Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC (GSN), le Réseau synoptique de base régional et le Réseau climatologique de base régional. Le fait que leurs stations fassent partie de ces réseaux oblige les Membres à partager leurs données sur le plan international.

Les données sont également échangées par l'intermédiaire du Système mondial de données (WDS) relevant du Conseil international des sciences (ISC). Le Système mondial de données œuvre pour garantir l'accès aux données solaires, géophysiques et environnementales connexes. C'est au service de l'ensemble de la communauté scientifique qu'il rassemble, passe au crible, organise et diffuse des données et informations. Le Système mondial de données recueille, enregistre et archive les mesures et les métadonnées qui s'y rapportent provenant de stations du monde entier et met gratuitement ces données à la disposition des milieux scientifiques. Dans certains cas, il fournit aussi des produits supplémentaires, notamment des analyses de données, des cartes de répartition des données et des résumés de données. Le Système mondial de données couvre notamment la météorologie, la paléoclimatologie, l'océanographie, les gaz atmosphériques à l'état de traces, la glaciologie, les sols, la géologie et la géophysique marines, les taches solaires, l'activité solaire, la physique des relations Soleil-Terre, la lumière du ciel, les aurores polaires et les rayons cosmiques.

L'OMM participe activement à la fourniture de données au Système mondial de données et exploite directement un certain nombre de centres associés. Les domaines de spécialisation des centres de l'OMM sont les suivants: l'ozone et le rayonnement ultraviolet, les gaz à effet de serre, les aérosols, l'épaisseur optique des aérosols, le rayonnement et la chimie des précipitations. Les principes d'accès aux données diffèrent entre les centres de l'ISC et ceux de l'OMM. Les centres de données de l'ISC s'échangent gratuitement leurs données et fournissent gratuitement ces données aux scientifiques de tous les pays. Les centres de données relevant de l'OMM doivent se conformer aux résolutions 40 et 25 mentionnées ci-dessus, ce qui leur permet de fournir au Système mondial de données quelques données et produits sous certaines conditions applicables à leur usage.

Outre le Système mondial de données relevant du Conseil international des sciences, beaucoup d'autres centres fonctionnent en application d'accords de coopération avec l'OMM ou avec certains SMHN. Citons notamment le Centre mondial de climatologie des précipitations et le Centre mondial de données sur l'écoulement (Allemagne); le Centre climatologique australien; le Centre mondial des données sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet (Canada); le Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni; et, aux États-Unis, l'Observatoire de la terre Lamont-Doherty de l'Université Columbia, les centres nationaux d'information sur l'environnement, le Goddard Distributed Active Archive Center relevant de l'Administration nationale

pour l'aéronautique et l'espace (NASA), le Réseau pour l'observation océan-atmosphère dans les mers tropicales (TAO)/Triangle Trans-Ocean Buoy Network (TRITON) et la Corporation universitaire pour la recherche atmosphérique.

Pour de nombreux Membres, l'échange de données numériques se révèle relativement simple compte tenu du nombre de systèmes de communication par ordinateur dont ils disposent. Le Système mondial de télécommunications (SMT) est un système de communication réservé à la météorologie qui relie presque tous les pays du globe. En tant que système opérationnel jouant un rôle crucial dans la prévision météorologique mondiale, il propose des services de communication fiables, quoique sur une largeur de bande parfois restreinte. Comme le réseau Internet, le SMT est fondé sur le regroupement d'un certain nombre de réseaux interconnectés, mais, en tant que système fermé, il n'est pas exposé aux problèmes de sécurité que connaît l'Internet. Il convient de protéger les voies de communication ouvertes, comme l'Internet, à l'aide des meilleurs logiciels de sécurité afin de prévenir tout accès indésirable aux fichiers, voire leur manipulation ou leur altération.

Il est très peu probable que deux pays utilisent les mêmes formats d'archivage pour les données climatologiques. Il importe donc que les données s'accompagnent d'une documentation sur les formats, qui décrive l'organisation des données, les types d'éléments, les unités employées et toute autre information pertinente. Par ailleurs, si les données sont compactées ou qu'elles se présentent sous un format spécial non textuel, le centre d'archivage veillera à fournir, avec les données numériques archivées demandées, les sous-programmes de lecture.

Grâce à des accords internationaux en matière d'échange de données, la compilation de données mondiales permet de produire des publications sur les normales climatiques telles que les publications intitulées *World Weather Records* et *Monthly Climatic Data for the World*. Les accords bilatéraux et multilatéraux revêtent aussi de l'importance en ce qui concerne la création et l'échange de jeux de données portant sur de longues périodes, tels que ceux du Réseau mondial de données climatologiques anciennes, les jeux de données aérologiques détaillées de référence et les jeux de l'ensemble international de données détaillées océan-atmosphère constitués par les États-Unis d'Amérique, ainsi que les jeux mondiaux de données d'observation du Centre Hadley constitués par le Royaume-Uni. Ces jeux de données sont en général mis à la disposition des centres de recherche.

Les systèmes d'information actuels de l'OMM ont été mis au point pour répondre aux besoins très divers de nombreux programmes et commissions. La multiplication des systèmes a créé des problèmes de compatibilité, d'inefficacité, de chevauchement et de coûts pour les Membres. Le Système d'information de l'OMM (SIO) est une nouvelle solution destinée à améliorer l'efficacité des transferts de données et d'informations entre les pays. Il est envisagé que ce système servira à recueillir et à échanger l'information destinée à tous les programmes de l'OMM et aux programmes internationaux connexes. On pourra y inclure aussi les données environnementales et géophysiques non météorologiques et non climatologiques, notamment les données écologiques ainsi que les données sur les tremblements de terre et les tsunamis. Le SIO est prévu de telle façon qu'il orientera l'évolution des systèmes d'information existants vers un système intégré répondant avec efficacité aux besoins des Membres en matière d'information internationale sur l'environnement.

Le SIO proposera une démarche intégrée visant à assurer la collecte régulière et la diffusion automatisée de données d'observation et de produits, à diffuser en temps voulu données et produits et à répondre aux demandes en la matière. Le système devrait être fiable, économique et abordable pour les pays en développement comme pour les pays développés. Il devrait aussi être durable du point de vue technologique, adapté aux compétences locales, modulaire, adaptable, souple et évolutif. Il devrait pouvoir s'ajuster en fonction de l'évolution des besoins, assurer la diffusion de produits provenant de diverses sources et permettre à toutes les parties prenantes d'y collaborer en rapport avec leurs responsabilités en la matière et avec leurs ressources financières. Il devrait également accepter différents groupes d'utilisateurs et différents principes d'accès, notamment ceux dont il est question dans les résolutions 40 et 25 citées ci-dessus, assurer la sécurité des données et des réseaux et intégrer divers jeux de données.

3.5 SAUVETAGE DES DONNÉES

Le sauvetage des données consiste notamment à structurer et à préserver les données climatologiques qui risquent d'être perdues en raison de la détérioration ou de la destruction des relevés, de la négligence, de la désuétude technologique ou de la simple dispersion des données au fil du temps. Les données non numérisées sont particulièrement menacées par la vulnérabilité des relevés papier d'origine. Le sauvetage des données recouvre les opérations suivantes: classement et numérisation en mode image des relevés sur papier, microfilm et microfiche; saisie des données numériques et textuelles et numérisation des données issues des diagrammes à déroulement continu dans un format utilisable; archivage des données, des métadonnées et des résultats du contrôle de la qualité et des procédures correspondantes. On trouvera dans le tableau 3.4 un récapitulatif des différentes étapes d'une opération de sauvetage des données climatologiques.

Tableau 3.4. Différentes étapes des opérations de sauvetage des données climatologiques

<i>Étapes du sauvetage des données</i>	<i>Mesure à prendre</i>	<i>Mots clés</i>
Archivage des supports papier et microfilm/microfiche	Chercher et localiser	SMHN, sites d'observation, universités, organismes chargés de l'aviation et des affaires maritimes, organisations agricoles, bibliothèques et bases de données internationales, archives nationales
	Conserver et stocker	Nettoyage des supports; dépôt dans des boîtes à archives en carton non acide étiquetées, à l'abri de la poussière, de l'humidité et des parasites
	Créer un inventaire électronique des fonds d'archives papier/microfilm	Inventaire de l'ensemble des supports papier; estimation de la charge de travail liée à la numérisation en mode image et à la numérisation en mode texte
Supports image	Créer un inventaire de référence des images	
	Créer des images électroniques et les valider Actualiser l'inventaire de référence des images Créer des inventaires des fichiers images sur chaque CD/DVD ou dans chaque répertoire d'ordinateur	Mise à jour de l'inventaire de référence des images après validation de leur lisibilité, y compris les métadonnées Recouplement des inventaires des fichiers sur CD/DVD avec l'inventaire de référence des images
Numérisation des données	Créer un inventaire des données numériques	
	Procéder à la saisie et au tracé des diagrammes	Saisie des données dans le CDMS
	Contrôler la qualité des données	Mise à jour de l'inventaire des données numériques à mesure que les données sont numérisées et soumises à divers tests de contrôle de la qualité
Archivage des supports numériques	Procéder à des recouplements entre les supports papier, les images et les données numériques	Comparaison des inventaires des images et des données numériques avec l'inventaire électronique des données sur papier/microfilm d'origine
	Sauvegarder les supports électroniques	Chaque jour

<i>Étapes du sauvetage des données</i>	<i>Mesure à prendre</i>	<i>Mots clés</i>
	Répartir de multiples copies des archives des images et des données numériques	En divers endroits
	Renouveler les supports et migrer vers de nouvelles technologies	Tous les 5 à 10 ans

Toute personne ou groupe possédant des données climatologiques (sur support papier, microfilm ou support numérique) devrait s'efforcer de contribuer à leur sauvetage. Les responsables de la gestion des relevés climatiques d'un pays ont un rôle particulier à jouer dans ce domaine, puisqu'ils sont bien placés pour procéder à l'évaluation et juger de la valeur des données à sauvegarder et pour savoir celles qui sont les plus importantes. Ces responsables travaillent souvent dans les services de climatologie des SMHN, et le sauvetage des données fait partie de leurs attributions en matière de conservation en tant qu'administrateurs de données climatologiques. On peut toutefois trouver des tenants du sauvetage des données dans bien d'autres institutions, tant publiques (services chargés de l'agriculture) que privées (universités, exploitations agricoles, entreprises du secteur agroalimentaire). De plus, des organisations de bénévoles, telles que l'Organisation internationale de sauvetage des données environnementales (IEDRO) et le projet de reconstitution de jeux de données sur la circulation atmosphérique (ACRE), ont été mises sur pied pour encourager le sauvetage des données. Parmi les autres parties intéressées, il faut citer les climatologues en activité ou à la retraite, les bibliothécaires, les historiens et les étudiants. Ces personnes peuvent se révéler très utiles lors de la mise en œuvre d'activités de production participative.

Les Directives sur les bonnes pratiques en matière de sauvetage des données climatologiques (OMM-N° 1182) donnent des indications détaillées sur tous les aspects du sauvetage des données climatologiques. Le [portail international pour le sauvetage des données](#) (I-DARE) est une ressource accessible en ligne destinée aux personnes intéressées par la conservation, le sauvetage et la numérisation des données. Le portail permet de centraliser, à l'échelle du globe, les informations concernant le statut des projets de sauvetage passés ou en cours, les données à sauvegarder ainsi que les méthodes et technologies en vigueur. Il s'agit d'une plate-forme d'échange d'informations sur tous les aspects du sauvetage des données, et notamment les techniques bien établies ou nouvelles en la matière. Ayant pour objectif de renforcer la visibilité des activités de sauvetage des données en cours, d'en favoriser de nouvelles et de mieux coordonner les activités de sauvetage menées à l'échelon international, le portail I-DARE constitue un précieux outil de communication. Il devrait en outre contribuer à mettre en évidence les lacunes et les possibilités nouvelles, permettre de donner la priorité aux régions où les besoins en matière de sauvetage des données se font le plus sentir et aider les parties prenantes à mobiliser des fonds pour les projets.

La réorganisation des relevés, la création d'images électroniques, la numérisation des données et les mesures de contrôle de la qualité inhérentes au sauvetage des données peuvent être coûteuses et prendre beaucoup de temps. Le lancement et la pérennisation d'un programme de sauvetage des données commence par le SMHN, qui doit clairement en démontrer la nécessité. Cela peut passer par la mise en avant de questions pratiques que l'on pourrait résoudre en disposant de données climatologiques de meilleure qualité. Il se peut par exemple que des données climatologiques anciennes permettent au SMHN de répondre à des questions concernant la fréquence des épisodes de sécheresse ou de fortes pluies, ou encore la direction des vents dominants au cours des cent dernières années. Ces informations constituent un produit «à valeur ajoutée» que les directeurs des SMHN pourraient monnayer et faire ainsi bénéficier leur organisme d'une source supplémentaire de revenus. De plus, la réorganisation des données climatologiques pourrait permettre de récupérer des centaines de mètres carrés dans les locaux du SMHN sans pour autant se débarrasser d'archives historiques précieuses. Les activités de sauvetage des données nécessitent souvent un soutien externe pendant plusieurs années. Les personnes ou les groupes ayant une certaine expérience du sauvetage des données peuvent donner des conseils et contribuer à convaincre d'éventuels bailleurs de fonds.

BIBLIOGRAPHIE

- Organisation météorologique mondiale, 1986: *Guidelines on the Quality Control of Surface Climatological Data* (WMO/TD-No. 111). Genève.
- , 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186, WCDMP-No. 53). Genève.
- , 2007: *Principes directeurs pour la gestion de données climatologiques* (OMM/DT-N° 1376, PMDSC-N° 60). Genève.
- , 2014: *Climate Data Management System Specifications* (WMO-No. 1131). Genève.
- , 2015: *Rapport final abrégé et résolutions de la Dix-septième Congrès météorologique mondial* (OMM-N° 1157). Genève.
- , 2016: *Directives sur les bonnes pratiques en matière de sauvetage des données climatologiques* (OMM-N° 1182). Genève.

AUTRES LECTURES

- Cornford, D., 1998: An overview of interpolation. In: *Seminar on Data Spatial Distribution in Meteorology and Climatology* (M. Bindi et B. Gozzini, éds). Volterra, Action COST 79, Union européenne.
- Cravatte, S., W. S. Kessler, N. Smith, S. E. Wijffels *et al.*, 2016: *First Report of TPOS 2020*. GOOS-215, consultable à l'adresse: <http://tpos2020.org/first-report/>
- De Gaetano, A.T., 1997: A quality control procedure for hourly wind data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14:137–151.
- Graybeal, D.Y., A.T. De Gaetano et K.L. Eggleston, 2004: Complex quality assurance of historical hourly surface airways meteorological data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:1156–1169.
- Kresse, W. et K. Fadaie, 2004: *ISO Standards for Geographic Information*. Berlin, Springer.
- Merlier, C., 2001: Interpolation des données spatiales en climatologie et conception optimale des réseaux climatologiques. Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission de climatologie (CCI) de l'OMM (Rapport OMM, Rapporteur principal sur les méthodes de statistiques chargé notamment de l'interpolation spatiale des données).
- Organisation internationale de normalisation, 2015: *ISO 9000:2015 – Systèmes de management de la qualité – Principes essentiels et vocabulaire*.
- , 2015: *ISO/IEC 17021-1:2015 Évaluation de la conformité – Exigences pour les organismes procédant à l'audit et à la certification des systèmes de management*.
- , 2018: *ISO 9004:2018 – Management de la qualité – Qualité d'un organisme – Lignes directrices pour obtenir des performances durables*.
- Service météorologique hongrois, 1997: *Proceedings of the First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data* (Budapest, 6-12 octobre 1996). Budapest.

CHAPITRE 4. CARACTÉRISATION DU CLIMAT À L'AIDE DE JEUX DE DONNÉES

4.1 INTRODUCTION

D'une année à l'autre, les archives climatologiques des SMHN ne cessent de croître. C'est à partir d'un nombre relativement faible de valeurs obtenues par l'application d'un ensemble de méthodes statistiques que les climatologues parviennent à extraire toutes les informations appropriées que contiennent les données. Grâce au choix judicieux et l'application scrupuleuse de ces méthodes, ils peuvent en effet isoler et mettre en lumière l'information pertinente que contiennent les données.

Le présent chapitre est consacré aux statistiques descriptives, à savoir l'outil servant à réduire un volume bien trop grand de données pour en comprendre les propriétés. Pour bon nombre des méthodes décrites dans ce chapitre, il y a lieu d'avoir recours à des ordinateurs afin de procéder au traitement et à la visualisation des données. Il convient néanmoins de souligner les dangers que présente l'application trop mécanique des méthodes d'analyse automatisées, car il est facile d'en faire mauvais usage et de mal interpréter les résultats obtenus. Bien que le recours à la machine présente des avantages incontestables, les hypothèses implicites que contiennent la plupart des logiciels d'analyse risquent fort d'être ignorées ou mal définies et de produire ainsi des résultats erronés.

Parallèlement au présent chapitre, il y a lieu de se reporter au chapitre 5 qui examine les méthodes statistiques. Dans les deux chapitres, on cherche à décrire des notions fondamentales et non à fournir des détails précis sur des sujets complexes. Pour cela, le lecteur se référera aux ouvrages cités dans la bibliographie ou à des manuels théoriques et pratiques de statistique.

4.2 ÉVALUATION DES JEUX DE DONNÉES

Un jeu de données est constitué d'un ensemble d'observations de plusieurs éléments. Une observation correspond à l'estimation d'une quantité. Certaines observations sont simples, comme la lecture d'un thermomètre ou celle du niveau d'eau dans un pluviomètre. D'autres sont plus complexes. Pour obtenir la pression atmosphérique à partir d'un baromètre à mercure par exemple, il faut mesurer à la fois la longueur de la colonne de mercure et la température du baromètre, la mesure de la pression étant considérée comme une seule et même observation.

Certains éléments présentent un caractère continu, à savoir qu'il n'y a pas d'interruption dans l'état du phénomène observé. C'est le cas de la température de l'air. D'autres, comme les précipitations, sont discontinus, alors que d'autres encore ne peuvent se traduire par des valeurs quantitatives, mais uniquement par des catégories descriptives, notamment les types de nuages ou le temps présent. Pour un élément, la population, c'est-à-dire l'ensemble statistique, représente toutes les valeurs possibles. Quand un élément est continu, la population est théoriquement infinie. Quand il est discontinu, la population est constituée de toutes les valeurs bien définies qu'on peut rencontrer pour cet élément, dans des limites fixées par l'analyste.

Un échantillon est un ensemble d'observations prélevées dans une population et destiné à représenter l'ensemble de cette population. Les jeux de données sont des échantillons. Plus l'effectif de l'échantillon est grand et plus l'estimation des caractères descriptifs de la population sera précise. Une grande partie de la climatologie porte sur l'étude des échantillons, mais l'analyste doit garder à l'esprit qu'un jeu de données peut être représentatif d'une partie seulement de la population. L'influence d'un manque d'homogénéité, d'une dépendance par rapport au temps et des variations dans l'espace, par exemple, complique l'interprétation de ce que représente le jeu de données.

Avant de décrire ou d'utiliser un jeu de données, il convient de vérifier l'exactitude et la validité des données, à savoir si les valeurs sont justes et si on peut s'en servir dans le but recherché. L'utilisateur d'un jeu de données ne doit jamais présumer, sans en avoir eu confirmation, que les données qu'il se propose d'utiliser sont exactes et valides, en particulier s'il ne dispose d'aucune information découlant des processus de contrôle de la qualité auxquels le jeu de données aurait été soumis lors de sa création. Il importe de savoir comment les données ont été recueillies, traitées et assemblées, et parfois même pourquoi elles ont été recueillies à l'origine. Le chapitre 3, qui porte sur la gestion des données climatologiques, traite de l'importance des métadonnées et du contrôle de la qualité, respectivement dans les sections 3.2 et 3.3.

4.3 VISUALISATION QUALITATIVE DES DONNÉES

Voici quelques-uns des caractères fondamentaux qui présentent souvent un intérêt: la valeur centrale ou valeur caractéristique, l'étalement ou l'étendue des observations, l'existence d'observations inattendues, la manière dont les observations s'éloignent de part et d'autre de la valeur centrale et la formation de grappes ou groupes d'unités contigües dans les observations. Sans une organisation systématique, il est difficile d'interpréter de vastes quantités de données pour en extraire ces caractères ou d'autres caractères analogues. La première étape consiste à se forger une idée générale de l'ensemble en visualisant la distribution des valeurs observées.

Le climatologue dispose de nombreuses méthodes pour visualiser des données afin d'établir une première estimation qualitative. Une première façon d'organiser les données consiste à classer les observations par ordre croissant ou décroissant. Les observations ainsi classées peuvent être présentées sous la forme d'un graphique ou d'un tableau, ce qui permet de faire apparaître certains caractères, notamment les valeurs extrêmes et l'étendue.

Une deuxième façon d'organiser le jeu de données consiste à grouper les données en classes ou intervalles. On compte alors le nombre d'observations que contient chaque intervalle. La représentation graphique de l'effectif de chaque intervalle ou du pourcentage de cet effectif par rapport au nombre total des observations fournit immédiatement une indication de la forme de la distribution des valeurs de la population étudiée; c'est ce qu'on appelle une distribution de fréquence dont la représentation est l'histogramme (figure 4.1). Le nombre d'intervalle est arbitraire, et l'apparence visuelle de la distribution sur l'histogramme est fonction du nombre des intervalles. En groupant les observations en classes, on perd une partie de l'information que contient le jeu de données. En général, moins le nombre des intervalles est grand et plus la perte est importante. Le choix du nombre d'intervalle devrait donc être un compromis entre l'exactitude, la facilité de communication, ce à quoi l'information doit servir et le test statistique auquel on soumettra les données.

Une troisième approche consiste à former une distribution cumulée, dont la représentation graphique peut être appelée courbe en ogive. Cette courbe se construit en pointant le nombre cumulé des observations, ou le pourcentage des observations, par rapport aux valeurs ordonnées de l'élément (figure 4.2). La courbe en ogive ou des fréquences cumulées est utile, car elle permet de déterminer la proportion des données se situant au-dessus ou au-dessous d'une certaine valeur. La proportion des valeurs inférieures ou égales à une certaine valeur, exprimée sous forme de pourcentage, se nomme percentile; un pour cent des observations sont plus petites que le premier percentile, deux pour cent sont plus petites que le deuxième percentile et ainsi de suite. De même, une proportion basée sur des dixièmes se nomme décile; un dixième des observations se situent au-dessous du premier décile, deux dixièmes se situent au-dessous du deuxième décile et ainsi de suite. Il s'agit de quartiles quand la population est découpée en quatre classes et de quintiles quand elle est découpée en cinq classes, ce qui présente un intérêt particulier dans le cas du calcul des normales de précipitation (voir 4.8.6).

On peut distinguer aussi d'autres formes de représentation, à savoir le diagramme en boîte ou boîte à moustache ou encore diagramme de Tukey (figure 4.3), le diagramme en tiges et feuilles ou tracé en arborescence (figure 4.4) et les arrangements de données (figure 4.5). Si l'ordre des données dans le temps est important, on peut produire des séries chronologiques à l'aide d'une représentation graphique des valeurs observées en fonction du temps (voir 4.6). Quand des

données combinent deux éléments, la vitesse et la direction du vent par exemple, il est possible de tracer des diagrammes de dispersion en pointant les valeurs du premier élément par rapport aux valeurs du deuxième élément (voir 4.5.2). Les roses des vents fournissent un excellent moyen de visualiser les données sur le vent. Les courbes des doubles cumuls, fréquemment employées par les hydrologistes et pour vérifier l'homogénéité des données, sont tracées en pointant les valeurs successives cumulées d'un élément en regard des valeurs cumulées correspondantes d'un autre élément (voir 5.2). Dans l'utilisation de techniques de visualisation, l'analyste n'est ainsi limité que par sa propre imagination et, dans tous les cas, il devra trier et classer les données. Quelle que soit la technique choisie, le tracé qui en résulte doit être source d'information et ne pas conduire l'utilisateur à tirer par erreur des conclusions sans fondement.

4.4 DESCRIPTEURS QUANTITATIFS SYNTHÉTIQUES DES DONNÉES

Au lieu de présenter l'intégralité d'un jeu de données pour en illustrer un caractère en particulier, il est souvent utile d'en extraire plusieurs indicateurs synthétiques ou mesures sommaires quantitatifs. Ces indicateurs aident à décrire des modèles de variation des observations. C'est en comprenant ces modèles qu'on approfondit la connaissance des processus physiques sur lesquels reposent les observations et qu'on améliore les déductions qu'on peut en tirer quant aux conditions climatiques passées et actuelles.

Il faut veiller à ce que les valeurs que contient un jeu de données dont on a extrait des indicateurs synthétiques soient bien comparables. Une série de mesures de la température par exemple ne contient des valeurs comparables que si toutes les observations ont été réalisées avec le même instrument, à la même heure quotidiennement, au même endroit et suivant les mêmes procédures. Si les procédures changent, des variations artificielles peuvent alors être introduites dans le jeu de données (voir 3.3, 3.4 et 5.2). Les descripteurs synthétiques d'un jeu de données font apparaître parfois des variations inattendues; tout schéma de variation inattendu doit donc être examiné pour déterminer s'il est provoqué artificiellement ou s'il révèle des effets réels du système climatique.

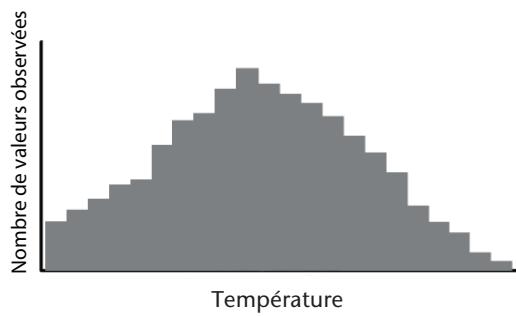


Figure 4.1. Distribution de fréquence (histogramme)

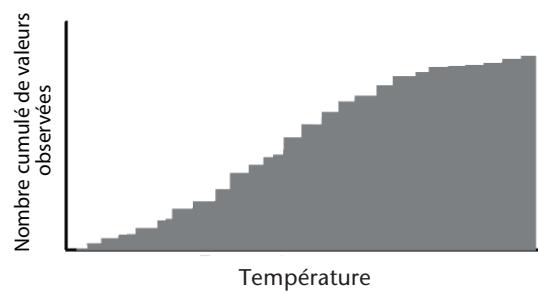


Figure 4.2. Distribution cumulée

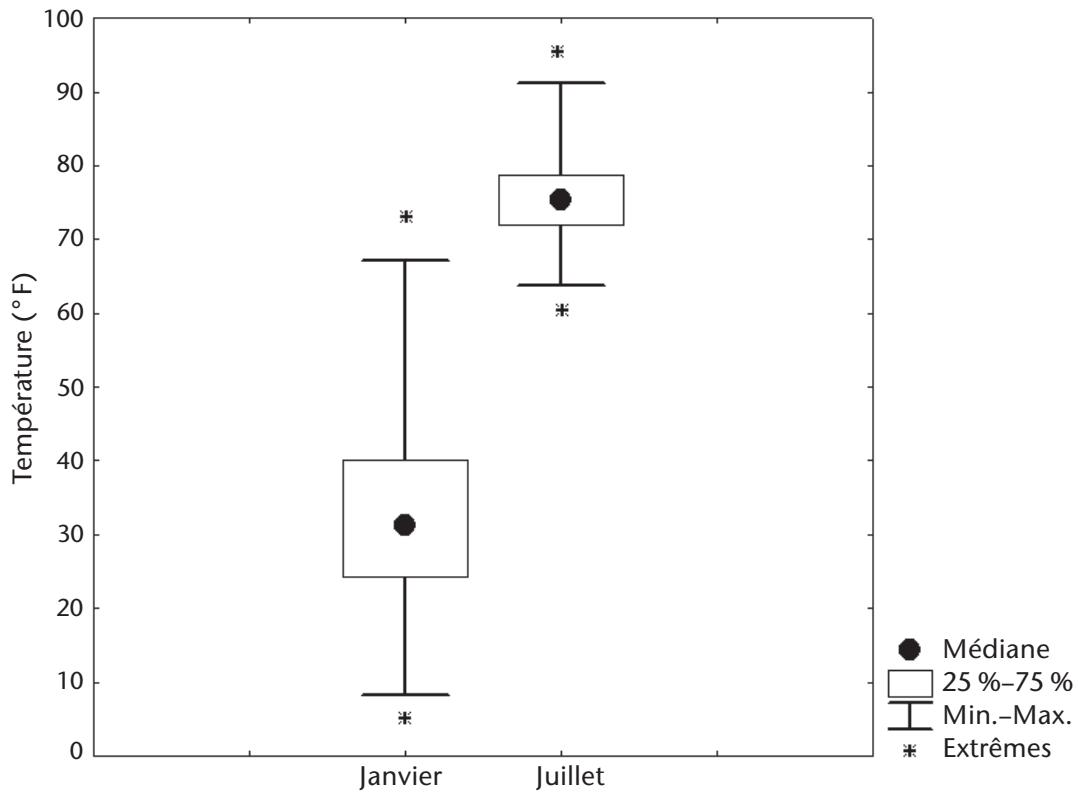


Figure 4.3. Diagramme en boîte

4.4.1 Modèles de données mis en évidence par la distribution de fréquence

Le fait de présenter les données sous forme graphique (voir 4.3) permet d'obtenir une vue qualitative de la structure d'une série d'observations. Des formes, schémas et modèles apparaissent. Il est possible de classer les distributions de fréquence suivant leur forme:

- Courbes unimodales symétriques: ces courbes sont fréquemment obtenues dans le cas de distributions de moyennes, notamment la température moyenne annuelle et sur de plus longues périodes. En général, plus la période de calcul de la moyenne est longue, plus la distribution est symétrique;

Tige				Feuille				
0	5	7	8					
1	2	3	3	7	9			
2	1	3	4	4	5	5	7	8
3	2	2	4	5	6	7	8	9
4	4	5	5	6	6	6	6	7
5	2	3	3	3	4	8	8	
6	1	1	3	3	4	5		
7	2	2	5	5	7			
8	4	6	7	7				

Figure 4.4. Exemple de diagramme en tiges et feuilles. La tige représente le premier chiffre du nombre correspondant à la valeur observée, tandis que la feuille représente le dernier chiffre de ce nombre. On peut noter, par exemple, qu'il y a deux observations d'une valeur de 25.

- Courbes unimodales modérément asymétriques: de nombreuses courbes de moyennes sont très fréquemment presque symétriques;
- Courbes unimodales fortement asymétriques: la forme de ces courbes montre un fort degré d'asymétrie; c'est souvent le cas pour les hauteurs de précipitation et les vitesses du vent;
- Courbes en U: ces courbes sont fréquentes pour des éléments présentant des limites bilatérales, tels que la nébulosité (le ciel est le plus souvent principalement dégagé ou principalement couvert).
- Courbes multimodales ou complexes: ces courbes correspondent souvent aux éléments observés quotidiennement dans des régions aux contrastes saisonniers bien marqués. Dans un tel cas, la courbe de distribution de fréquence obtenue à l'aide de l'intégralité du jeu de données peut prendre une forme bimodale très caractéristique. Il sera probablement plus facile de comprendre des jeux de données présentant des distributions de fréquence très complexes si on procède a priori à une stratification des données pour faire apparaître les différents processus sous-jacents.

Pour examiner plus d'une série d'observations, on simplifie le problème en examinant la distribution des observations d'une variable lorsque des valeurs précisées de l'autre ou des autres variables sont observées. Il s'agit de distributions conditionnelles de fréquence. Les conditions se fondent souvent sur une connaissance préalable de ce à quoi on s'attend ou sur une information quant à la probabilité d'occurrence de certains phénomènes. L'analyse conditionnelle des fréquences est particulièrement utile pour élaborer des scénarios climatiques et pour déterminer les incidences locales de phénomènes tels que le phénomène El Niño-oscillation australe (ENSO) et d'autres mécanismes de téléconnexion (fortes corrélations statistiques entre des régimes météorologiques dans différentes parties du globe).

Une méthode permettant de résumer la distribution d'un jeu de données d'observation consiste à faire correspondre une loi de probabilité aux observations. Les lois ou distributions de probabilités sont des fonctions aux propriétés mathématiques connues, caractérisées par un petit nombre de paramètres (généralement trois au plus). Les fonctions sont toujours établies de façon que les grandeurs relatives des différentes valeurs fassent apparaître les différences de probabilité relative que ces valeurs soient observées. Plusieurs distributions de probabilités couramment utilisées, comme la loi normale (ou de Gauss) ou encore la loi généralisée des valeurs extrêmes, décrivent des situations qu'on rencontre souvent dans la nature. S'il est possible de décrire une distribution de fréquence ou une distribution conditionnelle de fréquence observée grâce à ces densités de probabilités connues, alors on peut exploiter les propriétés et les relations pour

	Mois											
	Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1961	23	33	44	50	59	64	79	76	61	50	44	32
1962	26	31	40	54	60	67	78	73	60	49	40	30
1963	27	35	43	55	58	68	77	72	58	52	43	32
1964	24	37	47	58	57	64	79	74	59	54	46	34
1965	27	32	43	56	57	65	76	74	58	53	47	44
1966	30	38	44	53	58	67	80	75	58	55	46	32
1967	19	35	47	55	61	66	74	73	60	56	43	30
1968	22	33	46	56	60	69	78	70	56	52	45	30
1969	28	37	43	51	56	70	76	72	54	52	44	34
1970	25	34	46	56	58	63	73	71	54	50	43	31

Figure 4.5. Exemple d'arrangement de données

analyser les données et effectuer des inférences statistiques et probabilistes. Les figures 4.6 à 4.12 proposent des exemples de densités de probabilités pouvant approcher les distributions de fréquence observées pour des variables continues (variables pour lesquelles toutes les valeurs d'un intervalle peuvent être observées).

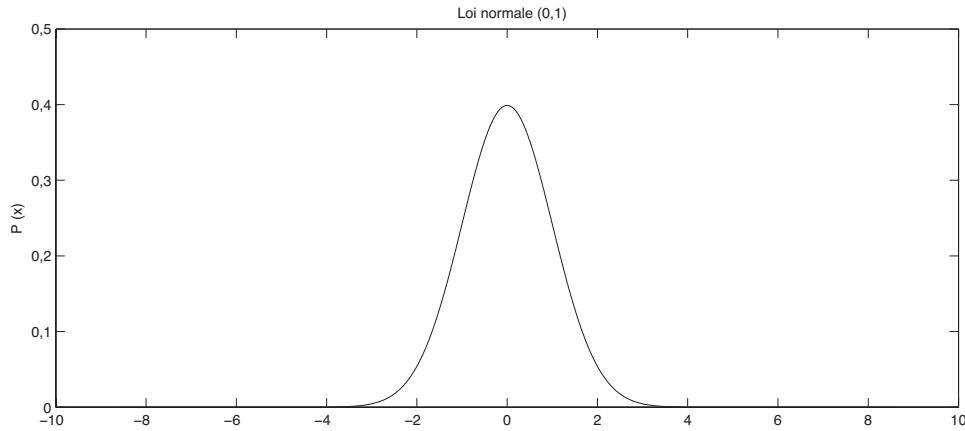


Figure 4.6. Loi normale ou de Gauss: pour le caractère observé, les valeurs du domaine de variation tendent à se grouper uniformément autour d'une seule valeur; c'est notamment le cas des températures moyennes annuelles.

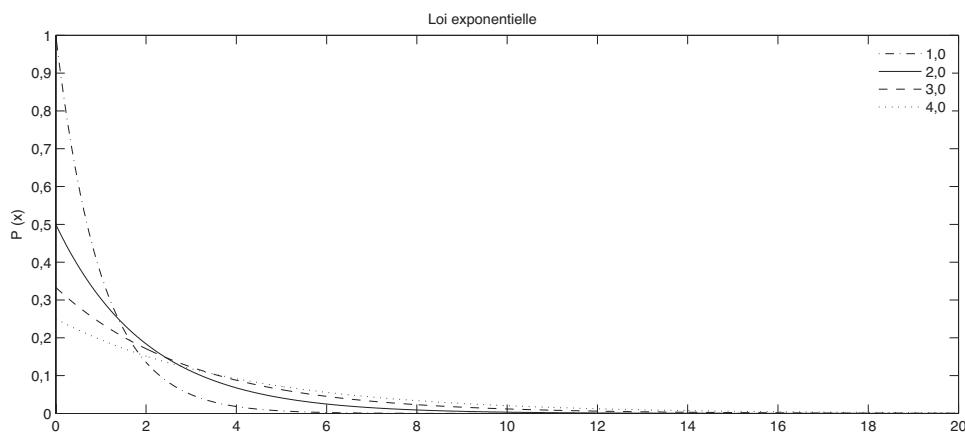


Figure 4.7. Loi exponentielle: décrit les intervalles de temps qui séparent des phénomènes susceptibles de se produire de façon continue et indépendante, selon une fréquence moyenne constante; utilisée pour l'analyse de la hauteur de précipitation quotidienne.

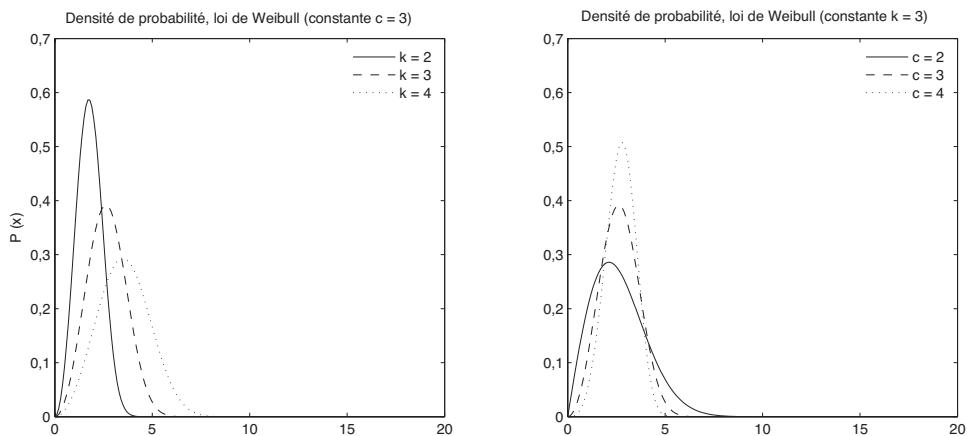


Figure 4.8. Loi de Weibull: décrit les intervalles de temps qui séparent des phénomènes susceptibles de se produire de façon continue et indépendante, selon une fréquence variable; utilisée pour l'analyse de la vitesse du vent.

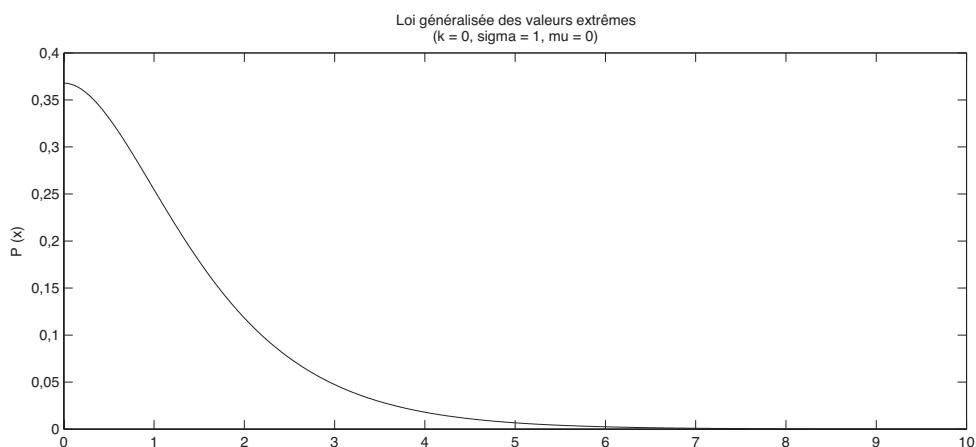


Figure 4.9. Loi généralisée des valeurs extrêmes: utilisée pour simuler des valeurs extrêmes dans une distribution.

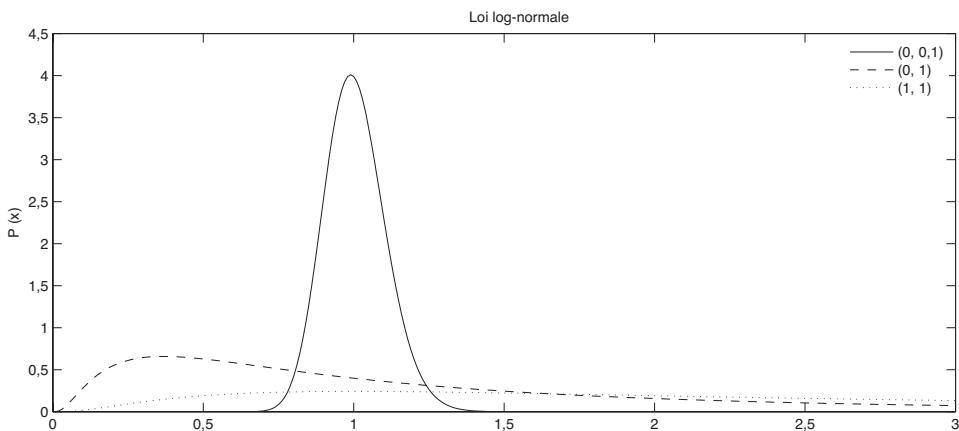


Figure 4.10. Loi log-normale: utilisée quand le logarithme d'une distribution correspond à la loi normale, notamment dans le cas de la distribution des concentrations de particules (pollution de l'air).

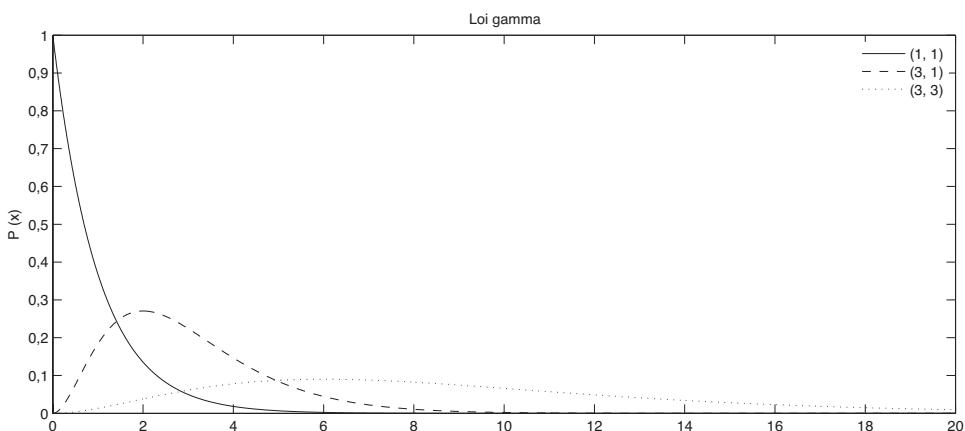


Figure 4.11. Loi gamma: décrit des distributions bornées d'un côté et asymétriques, notamment pour les données de précipitations.

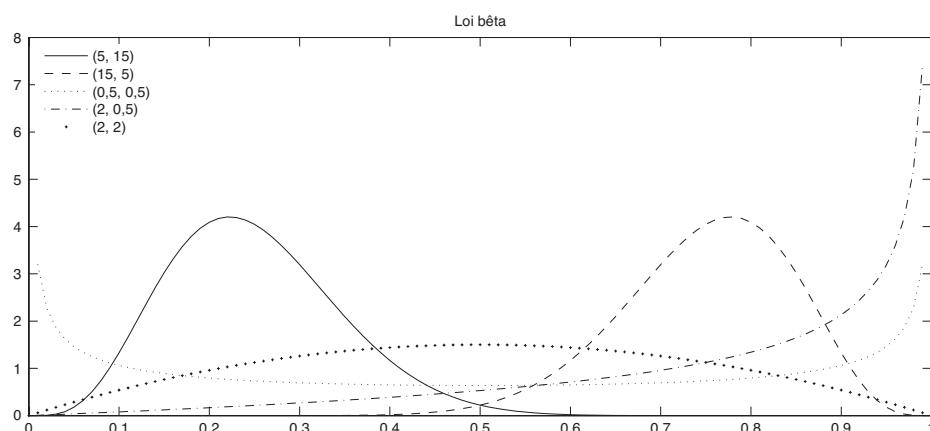


Figure 4.12. Loi bêta: décrit des distributions bornées des deux côtés, notamment pour les données sur la nébulosité.

Des distributions de fréquences statistiques sont aussi définies pour décrire des séries de données dont la valeur ne peut atteindre qu'une grandeur discrète bien définie. Le nombre de jours de précipitations dans un mois en est un exemple. Les valeurs possibles ne sont que des nombres entiers et 31 est la valeur maximale. Les figures 4.13 et 4.14 proposent des exemples de distributions de fréquences statistiques qui décrivent des données discrètes.

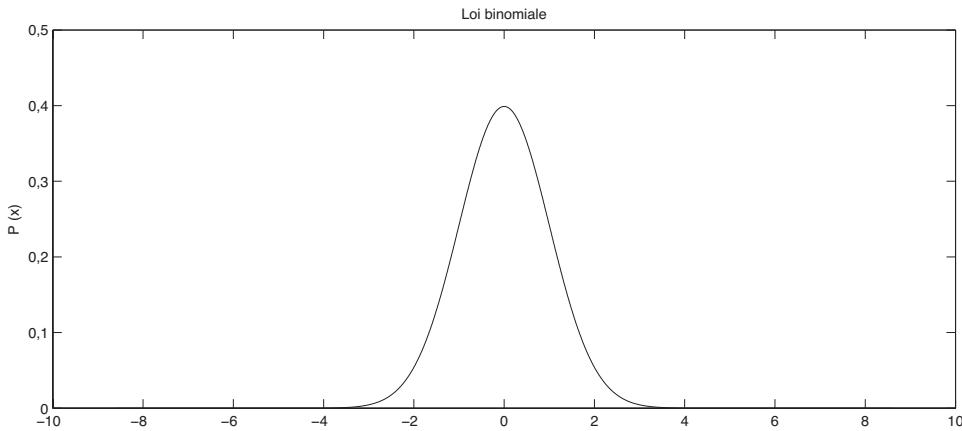


Figure 4.13. Loi binomiale: décrit deux événements discrets, notamment l'apparition ou non d'un phénomène.

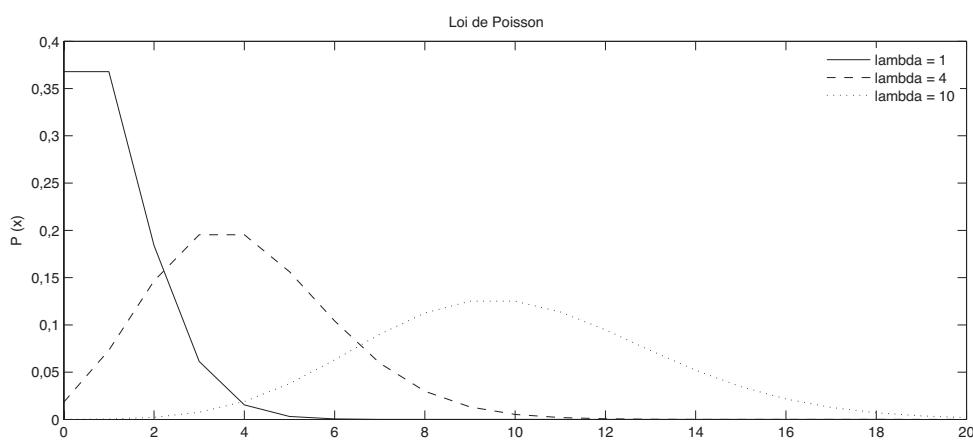


Figure 4.14. Loi de Poisson: décrit des événements rares, notamment la fréquence d'occurrence des tempêtes tropicales.

En observant la représentation graphique qualitative d'une distribution de fréquence, on parvient souvent à décider quelle distribution de fréquence statistique permettra de décrire une série de données. Si une distribution de fréquence statistique dont la fonction de probabilité est connue peut être employée pour décrire la série de données, il sera alors possible d'en tirer des inférences au sujet des données. Des méthodes bien définies permettent d'ajuster les distributions aux observations, notamment la méthode des moments, celle des moments pondérés et celle de vraisemblance maximale. Il y lieu de bien connaître le raisonnement statistique qui sous-tend une fonction de répartition pour établir des inférences statistiques valides au sujet des données auxquelles cette fonction s'applique.

Toute série d'observations peut être modélisée par des fonctions mathématiques qui reproduisent les observations, mais cela nécessite une attention particulière pour différentes

raisons. Quand on applique une fonction mathématique, on suppose en général que le jeu de données étudié, habituellement un échantillon, est suffisamment représentatif de la population dont il est tiré et que les données ne contiennent pas d'erreur (voir 3.4). En ajustant une fonction de répartition à des observations, on cherche en premier lieu à s'approcher de la distribution des données. Si l'ajustement est acceptable, alors, grâce à seulement quelques paramètres, la fonction appliquée à l'échantillon fournit une description réaliste des données, qui concorde bien avec les lois de la physique sous-jacentes et qui ignore les erreurs de données. Par l'ajustement d'une fonction, on se donne aussi pour objectif de décrire les données au sein d'un cadre théorique suffisamment simple pour qu'on puisse établir des inférences statistiques. Le surajustement d'un modèle mathématique peut conduire à une description irréaliste des données, trop d'importance étant accordée aux erreurs des données et à des facteurs aléatoires externes aux processus étudiés. Ce sont en général la manière dont on doit utiliser les données et les questions auxquelles le climatologue tente de répondre qui déterminent le degré de lissage à appliquer.

Pour déterminer si la fonction de répartition choisie décrit bien les observations, on peut examiner les différences entre les données observées et les valeurs produites par la fonction. Il convient de procéder à un test objectif de la qualité de l'ajustement. Il est en général possible de modéliser un jeu de données à l'aide de plusieurs fonctions. En comparant les résultats du test, on trouve alors la fonction la plus appropriée ou celle qui s'ajuste le mieux. On utilise souvent pour cela les tests du khi carré ou khi-deux (χ^2) et de Kolmogorov-Smirnov. Le test d'adéquation du khi carré concerne des valeurs discrètes et indépendantes (les observations n'ont aucune influence entre elles). Quand la somme des carrés des différences entre les fréquences observées et les fréquences ajustées dépasse un seuil établi en fonction de l'effectif de l'échantillon, l'ajustement est jugé incorrect. Ce test est sensible au nombre des intervalles choisi. Selon l'hypothèse du test de Kolmogorov-Smirnov, si la différence maximale absolue entre deux fréquences continues cumulatives d'observations indépendantes dépasse une valeur critique, alors les distributions sont probablement différentes. Ce test présente une bonne efficacité quand le jeu de données étudié comprend un grand nombre d'observations.

4.4.2 Paramètres de tendance centrale

Les observations ont souvent tendance à se grouper autour d'une valeur en particulier. Les paramètres de tendance centrale permettent de dégager une valeur centrale autour de laquelle les données tendent à se rassembler. Ces indicateurs ne se substituent pas à toutes les informations détaillées que peut contenir un ensemble complet d'observations. Souvent, le calcul d'un seul paramètre ne parvient pas à décrire la manière dont les données tendent à se concentrer, car il ne prend pas en compte la variation des observations. Tout paramètre de la tendance centrale devra donc s'accompagner d'une mesure du degré de variation des valeurs des observations à partir desquelles la tendance centrale est dérivée.

La moyenne arithmétique, ou plus simplement la moyenne, est l'un des indicateurs statistiques les plus couramment utilisés en climatologie. Elle est obtenue en divisant simplement la somme de toutes les valeurs par l'effectif total. Pour des observations qui tendent à se rassembler autour d'une valeur centrale, elle représente un nombre vers lequel la moyenne d'une très longue série chronologique d'observations ou d'un autre ensemble comprenant de nombreuses données tendra à converger plus le nombre des données augmente. La moyenne arithmétique n'est pas représentative de la tendance centrale de distributions fortement asymétriques.

Une moyenne pondérée s'obtient en attribuant différents degrés d'importance à certaines observations, pour que les valeurs les plus fiables ou les plus représentatives, par exemple, pèsent davantage dans le calcul de la moyenne. Cette pondération peut être obtenue par plusieurs méthodes. La pondération des distances, selon laquelle les coefficients de pondération attribués sont inversement liés à la mesure de la distance, en est un exemple courant. Par exemple, cette méthode s'applique souvent lorsque l'on veut établir une valeur moyenne représentative d'un lieu en particulier à partir d'observations relevées dans la région qui entoure ce lieu. Les coefficients de pondération correspondent en général à des relations mathématiques pouvant n'avoir aucun lien intrinsèque avec les processus physiques étudiés, mais, dans la mesure du possible, on essaiera de prendre en compte ces facteurs physiques dans le choix de la méthode

de calcul de la pondération. D'une façon générale, les méthodes de pondération fournissent de bons résultats quand les propriétés, à la fois physiques et statistiques, présentent des variations continues et relativement lentes dans les dimensions spatiales et temporelles étudiées.

La moyenne présente plusieurs avantages: il s'agit d'une valeur de référence très pratique pour analyser les fluctuations des observations (la somme des écarts à la moyenne est toujours nulle); elle se calcule facilement; les moyennes de différents sous-ensembles ne se chevauchant pas et faisant partie de l'ensemble des observations peuvent se combiner; et l'erreur que peut comporter l'estimation de la moyenne d'un échantillon est inférieure à celle des autres indicateurs de la tendance centrale (voir la publication intitulée *Sur l'analyse statistique des séries d'observations* (OMM-N° 415), section 3.1, exemples 26 et 27).

Les moyennes présentent cependant des limites. Quand une seule valeur est utilisée pour décrire une série d'observations, cela peut induire en erreur. Le calcul peut fournir des moyennes très proches pour des jeux de données ou des distributions présentant des structures internes totalement différentes. Par exemple, la moyenne d'une distribution bimodale de la nébulosité peut être la même que la moyenne d'une distribution unimodale, mais l'interprétation de ces deux moyennes sera très différente. La moyenne est assez sensible à la présence de valeurs exceptionnelles et inhabituelles; quelques valeurs extrêmes suffisent pour réduire à néant la représentativité d'une moyenne. La moyenne n'est pas un bon indicateur de la tendance centrale lorsque les observations ne se rassemblent pas autour d'une valeur centrale (par exemple les données sur la nébulosité qui tendent souvent à se concentrer soit près de 0 octa soit près de 8 octas). Pour qu'elle soit utile, une moyenne ne doit pas se limiter au simple résultat d'un calcul arithmétique, elle doit fixer une signification valide correspondant aux conditions réelles décrites par le jeu de données.

La médiane est la valeur centrale d'une distribution des fréquences cumulées; la moitié des données sont supérieures à la médiane et l'autre moitié lui sont inférieures. Pour l'obtenir, il convient de classer les données et de prendre la valeur centrale. Si le nombre de valeurs est impair, la médiane est la valeur centrale. Si le nombre de valeurs est pair, la médiane se situe entre les deux valeurs centrales et correspond généralement à la moyenne arithmétique ou à la moyenne pondérée de ces deux valeurs. Si ces deux valeurs sont identiques, leur valeur est prise pour médiane.

La médiane est moins sensible que la moyenne aux variations extrêmes, car c'est un indicateur de position. La médiane étant basée sur le nombre d'observations, l'ordre de grandeur des valeurs extrêmes n'a pas d'incidence sur elle. La médiane se révèle particulièrement utile quand les observations tendent à se rassembler autour du centre, mais que quelques-unes en sont aussi très éloignées dans un sens ou dans l'autre. Comme c'est le cas pour la moyenne, la médiane n'est pas un bon indicateur quand les données ne tendent pas à se grouper autour d'une valeur centrale.

Le mode détermine la valeur la plus fréquente dans un jeu de données. Comme la médiane, il s'agit d'un indicateur de position. Le mode n'est affecté ni par la valeur (comme c'est le cas de la moyenne) ni par la position des autres observations (comme c'est le cas de la médiane). Le mode de petits échantillons ou d'échantillons dans lesquels les observations sont rassemblées en plusieurs nuages ou grappes constitue une estimation peu fiable de la tendance centrale. Dans le cas de plusieurs concentrations d'observations véritablement caractéristiques (distribution multimodale), il est probable que le jeu de données comprend des facteurs dissemblables, chacun ayant une valeur centrale différente autour de laquelle les observations tendent à se rassembler.

Pour un élément de nature circulaire, la direction du vent par exemple, la notion de moyenne peut paraître ambiguë. La valeur du mode, notamment la direction dominante du vent, est souvent un paramètre de tendance centrale plus utile pour les éléments dont on mesure la direction.

Une quantité qui n'est déterminée que par sa grandeur est une grandeur scalaire. Quand une direction est associée à cette grandeur, il s'agit alors d'un vecteur. Le vecteur vent par exemple combine la vitesse et la direction du vent. En mathématique, il est possible de décomposer

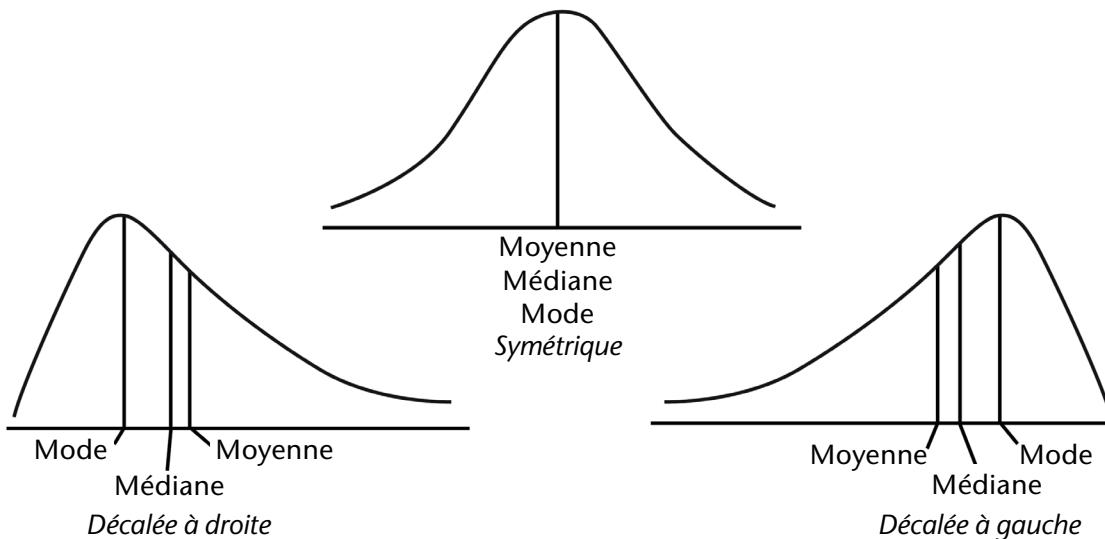


Figure 4.15. Relations entre la moyenne, la médiane et le mode

un vecteur en composantes indépendantes; on peut ensuite calculer les moyennes de ces composantes et les combiner pour obtenir un vecteur moyen résultant. Il est possible par exemple d'exprimer le vent comme une combinaison de deux grandeurs scalaires différentes, la vitesse vers l'est et la vitesse vers le nord, avec les vitesses vers l'ouest et vers le sud prenant des valeurs négatives. La tendance centrale du vecteur vent correspond au vecteur résultant formé à partir des tendances centrales des vitesses vers l'est et vers le nord. Le vecteur résultant obtenu à partir de données de directions opposées et de vitesses égales a un module nul. Ce calcul peut ne pas être significatif dans le contexte de la description du climat. Pour décrire le climat, il sera préférable de calculer une direction scalaire moyenne, en ignorant la vitesse, mais en tenant compte du caractère circulaire de la mesure (par exemple l'angle entre des directions du vent de 355° et de 5° est de 10° et non pas de 350°), et une grandeur scalaire moyenne ignorant la direction. Il est possible aussi de combiner la direction vectorielle résultante avec la grandeur scalaire moyenne.

Quand on se place dans le cas d'une distribution de fréquence unimodale parfaitement symétrique, comme dans celui de la loi de Gauss, les valeurs de la moyenne, de la médiane et du mode sont absolument identiques. Quand la distribution de fréquence présente une asymétrie positive vers les valeurs les plus élevées (étalée vers la droite), la moyenne sera la plus grande, suivie de la médiane puis du mode. Cet ordre s'inverse quand la distribution de fréquence présente une asymétrie négative vers les valeurs les plus basses (étalée vers la gauche). Ces relations (figure 4.15) et les propriétés des paramètres (tableau 4.1) doivent être prises en compte pour sélectionner un indicateur de la tendance centrale représentatif d'un jeu de données.

Tableau 4.1. Comparaison de certaines caractéristiques des mesures de la tendance centrale

<i>Caractéristique</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Médiane</i>	<i>Mode</i>
Soumise à l'influence des valeurs aberrantes	Oui	Non	Non
Représentative de la tendance centrale lorsque les distributions de fréquence sont peu dispersées	Oui	Oui	Oui
Représentative de la tendance centrale lorsque les distributions de fréquence sont largement dispersées	Non	Possible	Non
Représentative de la tendance centrale lorsque les observations sont regroupées en plusieurs groupes	Non	Possible	Non
Représentative de la tendance centrale lorsque les distributions de fréquence avec un seul groupe sont asymétriques	Non	Oui	Oui
Facilité de calcul	La plus facile à calculer	Facile à calculer à partir de données ordonnées	Facile à calculer à partir d'un histogramme
Somme des écarts égale à zéro	Oui	Pas toujours	Pas toujours
Possibilité de plusieurs valeurs	Non	Non	Oui
Indicateur de variabilité	Non	Non	Seulement s'il y a plus d'un mode

4.4.3 **Paramètres de dispersion**

Une fois qu'on a réussi à estimer de façon appropriée la tendance centrale, il est possible de mesurer la variabilité des observations individuelles autour de cette valeur. Le paramètre de dispersion ou de variation et son explication revêtent une importance fondamentale. Il y a cependant lieu de noter qu'il est difficile de juger de la variabilité dans une série d'observations ne comportant que peu de relevés.

Il est possible de mesurer la variabilité absolue et la variabilité relative. L'écart entre chaque observation et la tendance centrale peut se réduire à une valeur qui représente et décrit l'ensemble du jeu de données. Cette valeur correspond à la variabilité absolue.

La mesure la plus simple de la variabilité absolue est l'étendue des observations. L'étendue est la différence entre la valeur la plus grande et la valeur la plus petite de la série. Elle est très simple à calculer, mais présente de nombreux inconvénients. Si les valeurs extrêmes sont observées très rarement ou qu'elles sont très éloignées de la masse des observations, l'étendue sera de nature à induire en erreur. L'étendue ne fournit aucune indication quant à la nature de la distribution de fréquence entre les limites extrêmes. Elle ignore presque totalement aussi le degré de concentration des valeurs et ne décrit aucun caractère utile propre à l'ensemble du jeu de données. De plus, on ne peut se fonder sur l'étendue pour juger de la fiabilité de la tendance centrale.

L'écart interquartile est une autre mesure fréquemment utilisée de la variabilité absolue. C'est la différence entre le troisième et le premier quartile. Le premier quartile correspond à la valeur des observations ordonnées telle que 25 % des valeurs de la série lui sont inférieures et 75 %, supérieures. De même 75 % des valeurs de la série des données ordonnées sont inférieures à celle du troisième quartile et 25 % lui sont supérieures. L'écart interquartile réunit donc les 50 % des valeurs situées au centre de la série. Couplé avec la médiane, cet écart décrit certains des caractères de la distribution de fréquence. Il est possible de calculer d'autres écarts centraux de la même manière. L'écart interdécile, par exemple, est la différence entre le neuvième décile et le premier décile; il contient donc 80 % des observations centrales de la série.

L'écart moyen est la moyenne de la valeur absolue de tous les écarts entre chaque observation et le paramètre choisi pour représenter la tendance centrale. Certes il est possible de calculer les écarts par rapport à la moyenne, la médiane ou le mode, mais il convient théoriquement de choisir la médiane, car la somme des écarts en valeur absolue par rapport à la médiane est inférieure ou égale à la somme calculée à l'aide de la moyenne ou du mode.

L'écart type est la racine carrée de l'écart quadratique moyen ou encore la racine carrée de la moyenne des carrés de tous les écarts à la moyenne. Les écarts sont calculés par rapport à la moyenne et non par rapport à la médiane ou au mode, car la somme des carrés est alors la plus faible. Le fait de mettre au carré les écarts donne davantage de poids aux valeurs extrêmes. L'écart type est employé dans la dérivation de bon nombre de paramètres statistiques. Il est beaucoup utilisé aussi comme grandeur normative pour normaliser différentes distributions à des fins de comparaison.

La variabilité absolue n'est pas une mesure qui facilite les comparaisons. Il n'est possible de procéder à des comparaisons que lorsque les moyennes ayant servi au calcul des écarts sont à peu près égales et que les unités de mesure sont les mêmes. À titre d'exemple, comparer les écarts types entre un jeu de données de la température et un jeu de données de degrés-jour de chauffage n'a aucun sens.

Il est souvent nécessaire d'établir des comparaisons alors que les moyennes ne sont pas à peu près égales ou que les unités de mesure sont différentes. Il faut donc trouver des paramètres qui prennent en compte les moyennes servant à établir les écarts types et qui tendent à éliminer le problème que soulèvent les différences d'unités de mesure. C'est le cas de la variabilité relative, à savoir la relation entre la variabilité absolue et la grandeur de la tendance centrale. Le coefficient de variation en est un exemple; il est défini comme le rapport de l'écart-type à la moyenne du jeu de données.

4.4.4 Paramètre de symétrie

Le coefficient d'asymétrie évalue le défaut de symétrie d'une distribution. C'est une grandeur relative et sans dimension, ce qui facilite la comparaison entre jeux de données. La différence entre la moyenne et le mode divisée par l'écart type donne une mesure simple de l'asymétrie. L'asymétrie est positive quand la moyenne est supérieure au mode et négative quand c'est l'inverse. On utilise aussi d'autres mesures de l'asymétrie, notamment celle qui se fonde sur l'écart interquartile et la médiane.

Une asymétrie positive est caractéristique de certains jeux de données sur les précipitations dont la limite inférieure est zéro, mais dont les valeurs élevées ne sont pas bornées. Les jeux de données sur la température maximale quotidienne tendent souvent aussi à présenter une asymétrie positive, tandis que les jeux de données sur la température minimale quotidienne présentent plutôt une asymétrie négative.

4.4.5 Paramètre d'aplatissement

Les distributions de fréquences symétriques peuvent présenter différents degrés d'aplatissement dans leur partie centrale. Le coefficient d'aplatissement (le kurtosis) est un quotient sans dimension qui fournit une mesure relative permettant de comparer différents degrés d'aplatissement. Un coefficient d'aplatissement positif indique une distribution de fréquence présentant un maximum étroit en son centre, avec des fréquences chutant rapidement vers les valeurs basses en s'éloignant de la moyenne. S'il est négatif, la partie centrale de la courbe de distribution sera plus large et plate, c'est en général le cas de nombreuses distributions météorologiques, notamment celle des données sur l'humidité en altitude.

4.4.6 Indices

Un indice sert à représenter des conditions complexes sous la forme d'une simple indication numérique qui conserve une signification physique et qu'on peut utiliser pour surveiller un processus précis. L'indice exprime par une valeur unique un rapport entre des conditions observées et des conditions de référence. La référence utilisée correspond souvent, mais pas toujours, aux conditions climatiques moyennes. L'indice de sécheresse de Palmer en est un exemple; il permet de comparer, de façon sommaire, un bilan hydrique complexe composé des précipitations, de l'évaporation, du ruissellement, de l'alimentation des nappes et des propriétés des sols, dans des conditions climatiques moyennes. Dans la mise au point d'un indice, on distingue quatre composantes: la sélection des éléments qui composeront l'indice; le choix et le calcul des conditions de référence; la méthode de calcul de l'indice; et la pondération ou l'importance à accorder à chaque élément compris dans l'indice.

L'examen et la sélection des données qui composent l'indice représentent souvent une tâche plus compliquée que le calcul de l'indice. En ce qui concerne le choix des conditions de référence, il importe de garder à l'esprit que les caractéristiques des observations utilisées pour définir la référence peuvent évoluer dans le temps; il est essentiel d'utiliser des observations homogènes (voir 5.2). Il faut aussi veiller à ce que la référence représente des conditions normales, standard ou attendues, car c'est ce que la plupart des utilisateurs d'un indice tiendront pour acquis. Quand il s'agit de choisir une référence, il faut s'attacher aussi à définir de façon explicite ce que l'on doit comparer et dans quel but.

Le choix des coefficients de pondération est déterminant. Il faut veiller à bien évaluer l'importance de chaque élément qui contribue à l'indice par rapport à l'objectif du calcul de cet indice. S'il s'agit d'un indice qui continuera d'être utilisé à l'avenir, il faudra aussi s'attacher à examiner périodiquement la contribution de chaque élément compte tenu, par exemple, de son importance relative, de l'exactitude des données, des méthodes de mesure et du traitement des données.

Il existe d'autres indices élaborés spécialement pour évaluer le changement climatique sur la base des observations. Ces indices sont qualifiés d'indices du changement climatique (voir *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WCDMP-No. 72, WMO-TD No. 1500)).

4.5 CORRÉLATION

On a souvent besoin de dégager ou de décrire les relations qui lient les éléments entre eux. Une telle relation peut apparaître directement à l'examen de représentations graphiques des données, mais on fait souvent appel au calcul de paramètres quantitatifs. La corrélation est un paramètre qui quantifie une relation. Quel que soit le coefficient qu'on est amené à calculer, il importe d'observer qu'une corrélation ne sous-entend pas une relation de cause à effet, mais simplement que les éléments se comportent d'une manière identique. Il apparaît souvent que des facteurs autres que ceux qu'on étudie sont à l'origine de l'association observée; en météorologie et en climatologie, bon nombre de relations apparentes sont généralement trop complexes pour pouvoir être reliées à une cause unique. Qu'elle soit positive ou négative, une corrélation n'est pas nécessairement synonyme de lien de causalité, tout comme on ne peut éliminer ce type de lien quand la corrélation est nulle.

4.5.1 Tableaux de contingence

Les tableaux de contingence offrent un moyen simple mais efficace pour déceler des relations importantes entre différents facteurs, en particulier dans des jeux de données de volume important. On les établit généralement à partir de descripteurs qualitatifs (faible, modéré ou fort, par exemple) ou de variables dichotomiques (un phénomène s'est produit ou ne s'est pas

produit). On peut aussi dresser un tableau de contingence à partir d'une fréquence dépendant de deux éléments, notamment la vitesse et la direction du vent ou la distribution diurne de la visibilité. Le tableau 4.2 fournit un exemple de tableau de contingence.

Tableau 4.2. Tableau de contingence des accidents de la route et des observations de visibilité

	Visibilité inférieure à 200 m	Visibilité supérieure à 200 m	Total
Accident survenu	16	4	20
Aucun accident survenu	13	332	345
Total	29	336	365

On évalue souvent l'indépendance des éléments d'un tableau de contingence à l'aide du test du *khi carré*. Quand c'est le cas, l'autocorrélation qu'on observe souvent dans les séries chronologiques climatologiques, selon laquelle il est plus probable qu'une observation soit identique à l'observation précédente que le contraire (voir 4.6), va à l'encontre des hypothèses du test, ce qui rend douteuses les conclusions qu'on peut en tirer.

4.5.2 Coefficients de corrélation

Un diagramme de dispersion est aussi un outil simple mais utile pour visualiser des relations. Il peut faire apparaître une relation entre deux éléments ou la tendance d'un élément avec le temps, ou encore s'il existe ou non une relation intéressante. Les figures 4.16 et 4.17 fournissent des exemples de diagrammes de dispersion. Une association entre éléments et schémas temporels peut être parfois résumée par une mesure de la corrélation. Le coefficient de corrélation est la mesure la plus communément utilisée de l'existence d'une relation entre deux grandeurs. Il arrive aussi qu'on utilise le coefficient de Spearman (corrélation des rangs).

Le coefficient de corrélation est un nombre entre -1 et +1. Il mesure la relation linéaire entre deux éléments. Quand il est nul, cela signifie une absence de similarité de comportement entre les éléments étudiés. La figure 4.16 fournit un exemple de la dispersion attendue quand deux éléments présentent un très faible degré de corrélation. Quand le coefficient est égal à +1, cela signifie que l'augmentation de la valeur d'un élément est directement proportionnelle à l'augmentation de la valeur de l'autre élément. La figure 4.17 fournit un exemple de la configuration attendue lorsque les deux éléments présentent un degré de corrélation positive élevée. Quand le coefficient est égal à -1, cela signifie que si la valeur du premier élément augmente, la valeur de l'autre diminue proportionnellement. Un des inconvénients qu'il faut associer à l'emploi d'un coefficient de corrélation simple, c'est que la relation éventuelle est linéaire. Les éléments météorologiques sont souvent liés par des relations non linéaires; il est donc parfois nécessaire de transformer le jeu de données (voir 5.4) avant de calculer un coefficient de corrélation.

La corrélation des rangs de Spearman mesure une relation entre les rangs ordonnés de deux jeux de données. Le résultat du calcul est un nombre compris de nouveau entre -1 et +1. Quand les observations des deux jeux ne conservent pas le même ordre relatif, le calcul du coefficient donne un résultat faible ou négatif; quand elles présentent un ordre relatif identique, le coefficient est élevé et positif. Le coefficient de Spearman est moins sensible aux extrêmes que le coefficient de corrélation; il mesure une relation linéaire et signale quelquefois une relation non linéaire.

4.6 SÉRIES CHRONOLOGIQUES

Pour obtenir une série chronologique, il suffit de classer les observations en fonction du temps (figure 4.18). La représentation graphique des valeurs observées en fonction du temps constitue un outil qualitatif important pour faire apparaître l'évolution dans le temps. En climatologie, la tendance est une caractéristique intéressante qui résume le comportement d'un élément

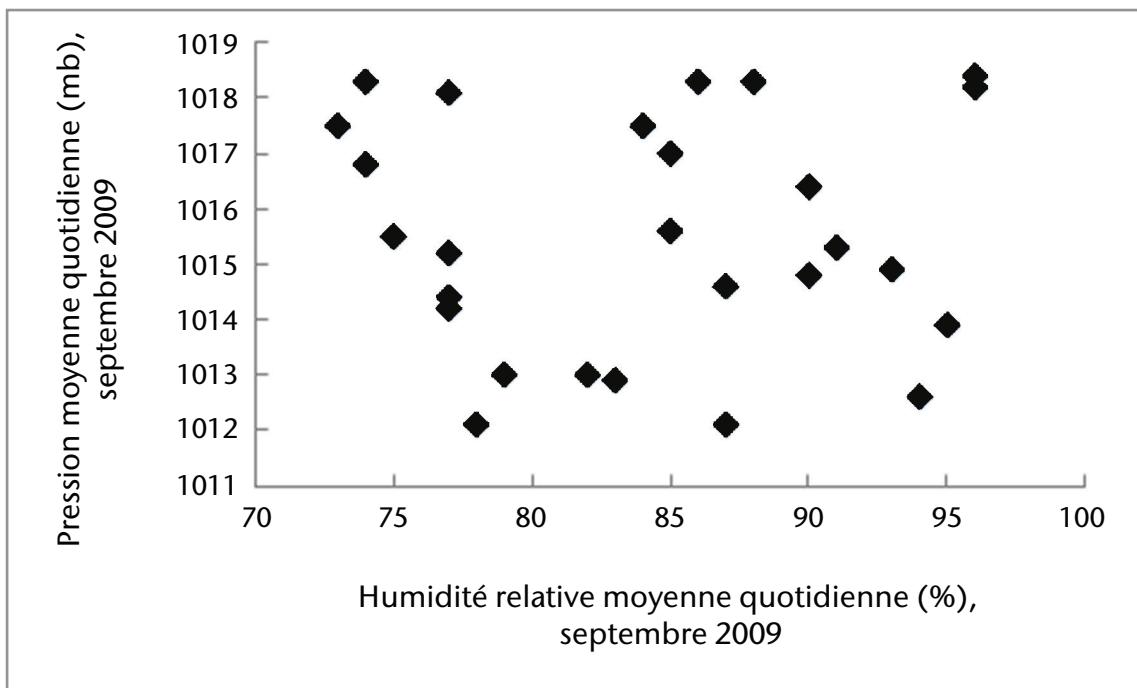


Figure 4.16. Diagramme de dispersion présentant une corrélation faible

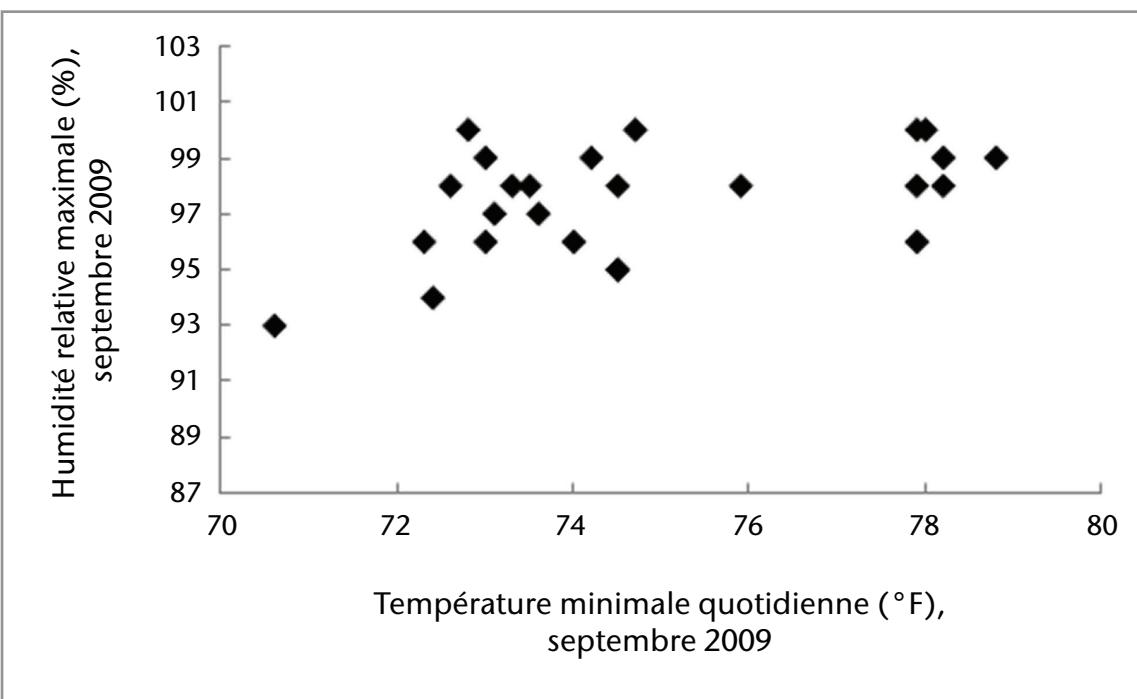


Figure 4.17. Diagramme de dispersion présentant une forte corrélation positive

sur la durée. La plupart du temps, ce sont les tendances linéaires d'une série chronologique qu'on examine, mais parfois il peut se révéler préférable de décrire la tendance selon une forme non linéaire, notamment une courbe ou un changement abrupt de pente vers le haut ou vers le bas. Qu'elles soient linéaires ou pas, les tendances observées dans les séries de données climatologiques s'inscrivent sur une période finie pouvant être relativement longue. Le système climatique a souvent montré des tendances dans une direction qui finissaient par s'inverser. Ce qui peut sembler être une tendance durable observée dans un relevé climatologique sur la période la plus récente pourrait appartenir à une oscillation lente liée à des variations

multidécennales qu'on ne peut discerner clairement, parce que l'intervalle de temps sur lequel apparaît cette tendance ne couvre qu'une partie de l'ensemble de l'oscillation ou qu'on ne sait comment la série évoluera à l'avenir. Le changement climatique anthropique pose un problème particulièrement ardu à ce sujet, car les décisions humaines seront probablement l'un des facteurs déterminants, par exemple, dans la durée du réchauffement mondial qu'on observe depuis un siècle. Pour que l'étude d'une série chronologique soit complète, il convient de déterminer non seulement les tendances, mais aussi les oscillations périodiques ou quasi périodiques et les variations irrégulières ou apparemment aléatoires que peuvent faire apparaître les données. L'analyse des séries chronologiques nous sert à comprendre comment les données varient en fonction du temps, suivant l'échelle qu'on s'est donnée.

Généralement, en météorologie comme en climatologie, les observations qui se succèdent tendent à être plutôt semblables que dissemblables. Pour mesurer ce caractère selon lequel chaque valeur est corrélée avec celle qui la précède, on utilise le coefficient d'autocorrélation. Le calcul est le même que pour le coefficient de corrélation (voir 4.5.2), si ce n'est que la deuxième série de valeurs est la même que la première, mais plus ou moins décalée dans le temps.

Les paramètres qu'on utilise pour représenter les tendances sont fonction du type de tendance qu'on veut isoler. Les tendances linéaires sont représentées par la pente d'une droite. Les tendances non linéaires sont représentées par des coefficients de variables mathématiques qui définissent l'équation d'une courbe, notamment les coefficients d'une fonction polynôme. De même, les caractères propres à la périodicité sont aussi représentés par des coefficients de variables mathématiques qui définissent les oscillations, comme la fréquence, la phase et l'amplitude de fonctions trigonométriques.

4.7 INTERPRÉTATION DES CARACTÉRISTIQUES SYNTHÉTIQUES DU CLIMAT

Bien qu'il soit possible de calculer de nombreux paramètres permettant de résumer le climat, il peut être inopportun d'utiliser ces paramètres pour décrire les jeux de données. Tous les paramètres qui, par la réduction des données, visent à déceler et décrire le signal climatique ou les relations climatiques se fondent sur des hypothèses. Si ces hypothèses ne sont pas valides, les paramètres qui résument les données risquent d'induire en erreur. Avant d'utiliser des paramètres synthétiques, il faut approfondir quatre points: les erreurs de données, le manque d'homogénéité, l'indépendance des observations et l'omission de facteurs importants.

Les erreurs touchant les données sont souvent les suivantes: erreurs d'enregistrement (transposition de chiffres par exemple); dégradation du signal de transmission; mauvaise compréhension des pratiques de codage par un observateur; erreurs de traitement (erreur de conversion des degrés Fahrenheit en degrés Celsius, par exemple); erreurs de logique et

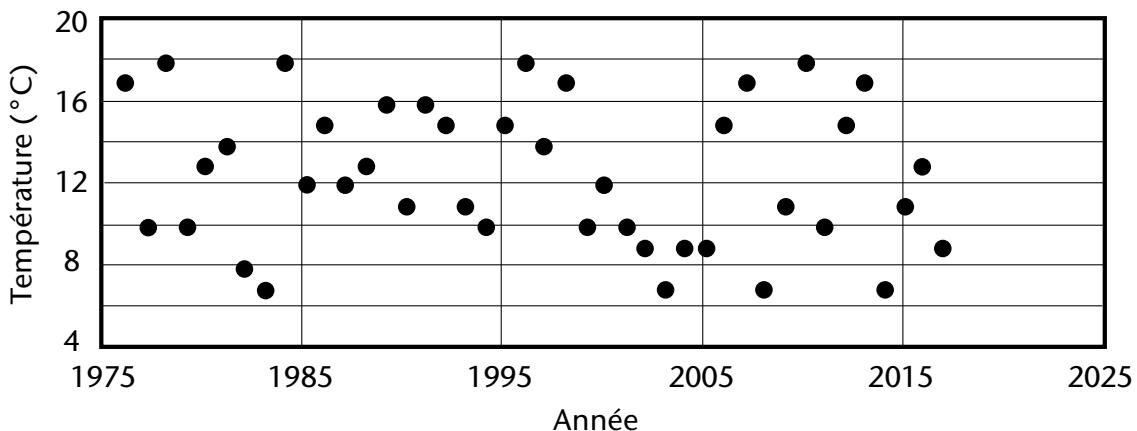


Figure 4.18. Série chronologique des valeurs de la température moyenne en mars

de codage des programmes informatiques; ou encore indicateur incorrect (lieu ou heure d'observation) associé à une valeur. Ces types d'erreur (voir 3.3.3 et 3.4), qui n'ont pas de lien avec les conditions physiques observées, peuvent contaminer les données de telle manière que l'analyse des données conduit à des conclusions inexactes.

L'utilisation de paramètres quantitatifs pour comparer des données qui ne sont pas réellement comparables, notamment quand il s'agit d'observations non homogènes, conduit souvent à des inférences statistiques erronées. Dans la mesure du possible, il convient de rendre homogène tout jeu de données qu'on se propose d'analyser (voir 5.2).

Dans le cas de nombreux jeux de données météorologiques, l'hypothèse d'indépendance n'est pas vérifiée. Avant de résumer un jeu de données, il faut veiller à éliminer, si possible, la dépendance entre les observations. À titre d'exemple, l'effet de cycles annuels connus peut être éliminé en grande partie en résument les écarts par rapport au cycle connu. Autre exemple: quand on sait que la persistance (autocorrélation) altère une série d'observations, comme c'est parfois le cas pour les températures quotidiennes observées au cours d'un anticyclone synoptique en surface, le modèle analytique doit en tenir compte. Si les modèles ne prennent pas en compte la dépendance, un sous-échantillonnage consistant à ne sélectionner qu'une seule observation parmi les observations ayant été effectuées au cours du phénomène persistant éliminerait la persistance que ces dernières présentent. Il faut cependant veiller à ne pas masquer une éventuelle oscillation sous-jacente, ce qui pourrait conduire à une analyse incorrecte.

On risque aussi d'aboutir à une explication incomplète ou erronée lorsqu'on présente des données quantitatives pour appuyer un seul facteur en omettant d'autres facteurs importants. La comparaison des températures au cours d'une saison froide entre un emplacement côtier et un emplacement continental en est une illustration. Les moyennes peuvent présenter suffisamment de similitudes pour qu'on soit amené à penser que les climats sont les mêmes, mais on n'aurait pas abouti à cette conclusion si l'on avait tenu compte de la variabilité plus importante que présente l'emplacement continental.

Toutes les techniques d'analyse statistique font implicitement appel à des hypothèses statistiques spécifiques portant par exemple sur la cohérence et l'homogénéité des données ou la nature de la dépendance des observations. L'analyste doit bien les discerner et les évaluer pour pouvoir assortir de certaines réserves son interprétation d'un indicateur synthétique suivant que ces hypothèses sont plus ou moins vérifiées. Quand une quelconque de ces hypothèses n'est pas validée, il convient de modifier l'interprétation de l'indicateur synthétique en conséquence. Il se peut que l'interprétation normale de l'indicateur ou du paramètre suffise, mais l'analyste doit néanmoins bien faire apparaître que des hypothèses ne sont pas vérifiées ou qu'il a un doute sur la question. Par exemple, si les températures moyennes annuelles sont calculées à partir d'un jeu de données dont on sait, grâce aux métadonnées, qu'il n'est pas homogène, l'hypothèse selon laquelle toutes les données sont comparables n'est pas vérifiée. L'analyste doit donc mentionner ce fait et son effet éventuel sur le calcul de la moyenne.

4.8 NORMALES

On utilise les normales climatologiques à deux fins principales. Ces normales servent de référence par rapport à laquelle il est possible de comparer des observations récentes ou actuelles, ce qui permet en outre de disposer d'une base pour de nombreux jeux de données d'anomalies climatiques (par exemple les températures moyennes mondiales). Elles servent largement aussi, implicitement ou explicitement, à déterminer les conditions auxquelles on peut s'attendre le plus dans un lieu donné.

La pratique consistant à établir des normales climatologiques remonte à la première moitié du XX^e siècle (voir les éditions précédentes du présent guide, le *Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume I, Définitions, et le *Manuel sur le chiffrement des messages CLIMAT et CLIMAT TEMP* (OMM-DT-N° 1188, 1.2.3)). Il avait été recommandé de faire porter la période de référence sur 30 ans, cette durée étant prise pour norme essentiellement parce qu'on ne disposait que de 30 années

d'observations quand cette recommandation générale a été formulée. À l'origine, les normales devaient permettre la comparaison entre les observations du monde entier. Ce n'est que progressivement au cours du XX^e siècle qu'elles furent utilisées en tant que prédicteurs.

La plupart du temps, les normales climatologiques sont essentiellement centrées sur la valeur moyenne d'un élément climatique pour une période donnée. Comme cela a été dit dans la section 4.4.2, la moyenne ne fournit qu'une description incomplète du climat, et beaucoup d'applications nécessitent des indications sur d'autres aspects de la distribution de fréquence et du comportement statistique de l'élément en question, tels que la fréquence sur de longues périodes quand une valeur dépasse un certain seuil. Les valeurs extrêmes d'un élément pour une période bien précise et d'autres descripteurs statistiques de la distribution de fréquence (comme l'écart type des valeurs quotidiennes ou mensuelles) sont des indicateurs utiles du climat en un lieu; aussi est-il bon de les faire figurer dans les séries de normales.

Bon nombre de SMHN calculent les normales quotidiennes en plus des normales mensuelles et annuelles. Bien qu'elles ne soient pas requises par l'OMM, les normales quotidiennes fournissent une illustration du caractère non aléatoire des variations quotidiennes d'un élément, ce que les normales mensuelles ne permettent pas. On les calcule en établissant la moyenne des valeurs d'un élément pour un jour précis du calendrier sur une période donnée. Les valeurs observées sont habituellement lissées par moyennes mobiles sur trois à sept jours ou à l'aide d'un filtre binomial destiné à réduire les effets d'une variabilité temporelle aléatoire de fréquence élevée correspondant aux systèmes météorologiques. On peut aussi ajuster aux séries de moyennes quotidiennes, calculées à partir des observations, des fonctions de lissage par interpolation (spline), trigonométriques ou polynomiales, ces séries de données lissées devenant alors les normales quotidiennes (voir 5.8).

4.8.1 Période utilisée pour les calculs

Une période de référence relativement stable s'avère nécessaire pour les évaluations de la variabilité du climat à long terme et la surveillance des changements climatiques. Par le passé, les normales climatologiques standard étaient calculées tous les 30 ans pour des périodes de 30 ans (1901–1930, 1931–1960, 1961–1990, etc.). Dans le but précis de surveiller l'évolution du climat à long terme, les normales calculées pour la période comprise entre le 1^{er} janvier 1961 et le 31 décembre 1990 se réfèrent à une période de référence de l'OMM stable et devraient être maintenues indéfiniment ou jusqu'à ce qu'un changement de période s'impose pour des motifs scientifiques impérieux.

Cependant, un climat en pleine évolution nécessite aussi des calculs plus fréquents des normales climatiques. Par exemple, des jeux de données sur la température mondiale ont été calculés en tant qu'anomalies par rapport à la période de référence 1961–1990. Le fait d'utiliser une période plus récente pour calculer des moyennes, notamment 1981–2010 (voir figure 4.19), permet d'obtenir des résultats dont le caractère prédictif sera meilleur pour les éléments qui présentent une tendance séculaire (séries chronologiques caractérisées par une augmentation ou une diminution constante des valeurs mesurées sur une longue période). Pour de nombreux utilisateurs, les normales de 1981–2010 apparaîtront naturellement comme plus récentes que celles de 1961–1990. Les normales climatologiques standard sont calculées tous les 10 ans pour des périodes de 30 ans au début de chaque décennie commençant par l'année se terminant par le chiffre 1 (1981–2010, 1991–2020, etc.). Le recalcul des normales tous les 10 ans nécessite aussi le recalcul de nombreux jeux de données qui utilisent les normales comme référence (degrés-jours, écarts par rapport à la normale, etc.). L'apparition de nouveaux moyens de calcul et de systèmes de gestion des bases de données de plus en plus perfectionnés devrait relativement faciliter ces calculs.

Plusieurs études ont montré que 30 années ne constituent pas en général une période optimale pour calculer des normales utilisées à des fins de prévision de l'évolution probable. La période optimale pour les températures est souvent bien plus courte que 30 ans, tandis que la période optimale pour les précipitations est souvent bien plus longue que 30 ans. La publication intitulée *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate* (WMO/TD-No. 1377) ainsi que d'autres ouvrages indiqués à la fin du présent chapitre fournissent davantage de détails sur l'utilisation

des normales de différents éléments aux fins de prévision. À des fins de prévision, on incite les SMHN à établir des moyennes ainsi que des moyennes d'une période. La durée optimale des relevés visant à l'utilisation de normales à des fins de prévision varie en fonction de l'élément considéré, de la géographie du lieu et de la tendance séculaire. D'une manière générale, une période de 5 à 10 ans correspondant aux relevés les plus récents a autant de valeur prédictive qu'une série chronologique recueillie sur 30 ans. Par rapport aux périodes de calcul des normales climatologiques standard, des périodes plus courtes permettent de calculer des normales en intégrant un bien plus grand nombre de stations qu'il n'est habituellement possible de le faire sur une période permettant de calculer des normales standard. En ce qui concerne les éléments qui présentent une tendance sous-jacente non négligeable (la température moyenne, par exemple), leur caractère prédictif sera amélioré si les moyennes et les moyennes d'une période sont mises à jour fréquemment.

Dans toutes les publications présentant des périodes de référence, des normales et des moyennes, ainsi que dans toutes celles où on les utilise pour analyser et faire apparaître la variabilité du climat, il importe de consigner la période sur laquelle portent les calculs et les méthodes de calcul employées.

4.8.2 **Stations pour lesquelles les normales et les moyennes sont calculées**

Il y a lieu de calculer des normales et des moyennes climatologiques pour un éventail de stations aussi large que possible, à condition que ces stations respectent les normes établies quant à la quantité et au caractère complet des données nécessaires. Dans la mesure du possible, il convient d'effectuer ce calcul au moins pour toutes les stations qui diffusent leurs données par l'intermédiaire du Système mondial de télécommunications (voir le *Manuel du Système mondial de télécommunications* (OMM-N° 386), supplément I-3, 2.1 c), et supplément I-5, 4.1 e) et tableau D, 3.1 a)).

4.8.3 **Homogénéité des données**

Les données utilisées pour le calcul des normales et moyennes climatologiques devraient, dans la mesure du possible, être homogènes. La question de l'homogénéité est examinée plus en détail dans la section 5.2. En ce qui concerne les normales et moyennes climatologiques, les problèmes d'homogénéité qui nécessitent une attention particulière sont toutes les modifications apportées aux lieux d'observation, aux procédures d'observation, y compris les changements d'heures, aux types d'instruments utilisés, à l'exposition des instruments dans le temps et au traitement des données.

Dans la pratique, il ne sera pas possible d'établir des jeux de données répondant aux critères d'homogénéité pour de nombreux emplacements. Il peut alors s'avérer nécessaire de produire des normales à partir d'un ensemble composé de deux parties ou plus d'une série de relevés manquant d'homogénéité. Une solution consiste à apporter des ajustements à la partie la moins récente de la série de relevés afin de la rendre le plus homogène possible par rapport aux données les plus récentes.

4.8.4 **Données manquantes**

Le fait de calculer des normales à partir de jeux de données incomplets peut fausser les résultats. Par exemple, si une année comprise dans la période de calcul a été particulièrement froide et que les normales ont été calculées sans les données de cette année, alors les normales seront plus élevées que si le calcul avait inclus ces données. Comme les données climatologiques se caractérisent souvent par une forte autocorrélation, le fait que des données manquantes concernent des observations consécutives peut avoir une incidence plus forte sur les normales que si le même nombre de données manquantes avait été réparti de façon aléatoire sur la période de calcul.

Il est conseillé de calculer les normales ou les moyennes pour une période donnée uniquement lorsque l'on dispose des valeurs d'au moins 80 % des années de la série de relevés, avec au plus trois années consécutives manquantes. Quand les données manquantes concernent une période relativement longue mais qu'après cette période les relevés sont jugés suffisamment complets, une autre solution consiste à calculer une moyenne pour cette période à l'aide uniquement des données provenant des années qui suivent l'interruption dans les relevés.

Les normales ou les moyennes annuelles devraient correspondre à la moyenne ou à la somme (suivant le cas) des douze valeurs normales ou moyennes mensuelles, sans tenir compte de la durée variable des mois (voir les *Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques* (OMM-N° 1203), 4.4). Le calcul des normales annuelles n'est possible que si aucune normale mensuelle ne manque.

Il est recommandé de ne pas calculer de valeur mensuelle quand plus de dix valeurs quotidiennes ou plus de quatre valeurs quotidiennes consécutives sont manquantes. Pour des éléments dont la valeur mensuelle est une somme de valeurs quotidiennes et non une moyenne (notamment pour la hauteur de pluie ou la durée d'insolation), on ne devrait calculer une valeur mensuelle qu'à condition de disposer de toutes les observations quotidiennes ou alors qu'à condition que tout jour manquant soit inclus dans une observation cumulative, couvrant la période correspondant aux données manquantes, pour le jour où les observations reprennent. Dans la publication intitulée *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals* (WMO/TD-No. 341), il est recommandé d'appliquer des critères plus stricts au calcul des moyennes, les limites étant de plus de cinq valeurs quotidiennes manquantes ou trois jours successifs manquants.

4.8.5 Température moyenne quotidienne

Il existe de nombreuses façons de calculer la température moyenne quotidienne. On peut utiliser la température maximale quotidienne et la température minimale quotidienne, des observations exécutées sur 24 heures, des observations synoptiques ou encore des observations prises à des heures bien précises sur un jour. Pour qu'une moyenne fournit la meilleure approximation statistique, elle doit se baser sur l'intégration d'observations continues effectuées sur une période de temps donnée; plus la fréquence des observations est élevée et plus la moyenne sera exacte. Pour des raisons pratiques, il est en général impossible de calculer les moyennes quotidiennes à partir d'un grand nombre d'observations réparties de façon équidistante sur une période de 24 heures, car bon nombre de stations d'observation n'assurent pas la mesure en continu

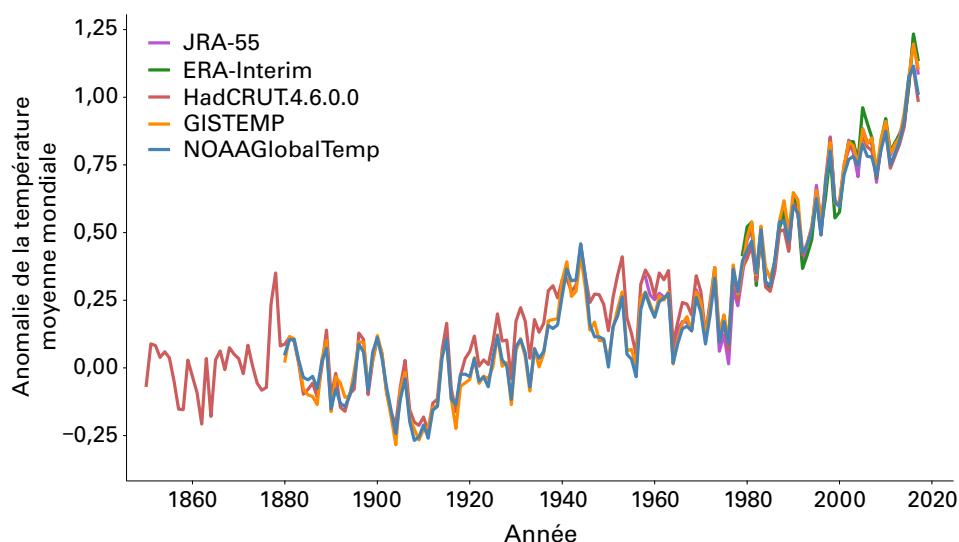


Figure 4.19. Anomalies de la température mondiale par rapport à la période de référence 1850–1900, selon les cinq jeux de données mondiaux (avec l'aimable autorisation du Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni)

d'un élément. À des fins de comparaison, il est souhaitable de fixer une méthode de traitement normalisée applicable à toutes les stations dans le monde, en tentant d'intégrer le maximum de stations.

La température maximale quotidienne et la température minimale quotidienne sont observées dans toutes les stations climatologiques ordinaires (voir 2.2.1). Aussi la méthode recommandée pour le calcul de la température moyenne quotidienne consiste-t-elle à prendre la moyenne des températures maximale et minimale quotidiennes. Cette méthode n'offre pas la meilleure approximation du point de vue statistique, mais son utilisation systématique satisfait les critères de comparaison des normales. Les SMHN devraient aussi calculer les moyennes quotidiennes à l'aide d'autres méthodes, si cela permet d'améliorer la connaissance du climat national.

4.8.6 **Quintiles des précipitations**

Les quintiles des précipitations servent à établir une relation entre une hauteur totale mensuelle de précipitation observée et la distribution de fréquence des valeurs observées au cours de la période pour laquelle les normales ont été calculées. Il n'existe pas de méthode universellement reconnue pour calculer les limites des quintiles, et le choix de la méthode peut avoir une grande incidence sur les valeurs obtenues. Voici cependant la procédure recommandée pour calculer ces limites:

- a) Pour chacun des douze mois de l'année, les 30 valeurs mensuelles de la hauteur de précipitation, tirées de la période normale de 30 ans, sont classées en ordre croissant. La liste ainsi constituée est divisée en cinq groupes (quintiles) comprenant chacun six valeurs. Le premier quintile contient les six valeurs les plus basses qui, pour le mois en question, ont été observées au cours de la période de 30 ans. Les deuxième, troisième et quatrième quintiles contiennent les valeurs intermédiaires en ordre croissant et le cinquième quintile, les six valeurs les plus élevées;
- b) Comme limite entre deux quintiles successifs, on prend une valeur située à mi-chemin entre la valeur la plus élevée du quintile inférieur et la valeur la plus basse du quintile supérieur. À partir des quintiles est établi un indice des précipitations qui correspond au numéro du quintile dans lequel se classe la hauteur mensuelle de précipitation du mois pour lequel le message est établi, les règles spéciales ci-après s'appliquant:
 - i) Pour une hauteur de précipitation nulle, l'indice est égal à 0 si l'observation est exécutée en dehors de la période de référence, il est égal à 1 si l'observation est exécutée six fois au maximum au cours de la période de référence; il est égal à 2 si l'observation est exécutée entre 7 et 12 fois; il est égal à 3 si l'observation est exécutée entre 13 et 18 fois; et ainsi de suite;
 - ii) Pour une hauteur de précipitation inférieure à la valeur la plus basse de la période de référence, l'indice est égal à 0 (que la hauteur de précipitation soit nulle ou pas);
 - iii) Pour une hauteur de précipitation supérieure à la valeur la plus élevée de la période de référence, l'indice est égal à 6.

BIBLIOGRAPHIE

- Organisation météorologique mondiale, 1989: *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals* (WMO/TD-No. 341, WCDP-No. 10). Genève.
- _____, 1990: *Sur l'analyse statistique des séries d'observations* (OMM-N° 415). Genève.
- _____, 2004: *Manuel sur le chiffrement des messages CLIMAT et CLIMAT TEMP* (OMM/DT-N° 1188). Genève.
- _____, 2007: *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate* (WMO/TD-No. 1377, WCDMP-No. 61). Genève.
- _____, 2009: *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WCDMP-No. 72, WMO/TD-No. 1500). Genève.
- _____, 2015: *Règlement technique* (OMM-N° 49), Volume I – Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées. Genève.
- _____, 2015: *Manuel du Système mondial de télécommunications* (OMM-N° 386). Genève.
- _____, 2017: *Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques* (OMM-N° 1203). Genève.

AUTRES LECTURES

- Angel, J.R., W.R. Easterling et S.W. Kirtsch, 1993: Towards defining appropriate averaging periods for climate normals. *Climatological Bulletin*, 27:29–44.
- Asnani, G.C., 1993: *Tropical Meteorology* (2 vol.). Pune, Sind Society.
- Barnston, A.G. et R.E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115:1083–1126.
- Bhalme, H.N. et D.A. Mooley, 1980: Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108:1197–1211.
- Bhalme, H.N., D.A. Mooley et S.K. Jadhav, 1984: Large-scale April pressure index connected with the southern oscillation and its potential for prediction of large-scale droughts over India. *Mausam*, 35(3):355–360.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett et P.D. Jones, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*, 111, D12106.
- Dixon, K.W. et M.D. Shulman, 1984: A statistical evaluation of the predictive abilities of climatic averages. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:1542–1552.
- Guttman, N.B., 1989: Statistical descriptors of climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70:602–607.
- Huang, J., H.M. van den Dool et A.G. Barnston, 1996: Long-lead seasonal temperature prediction using optimal climate normals. *Journal of Climate*, 9:809–817.
- Lamb, P.J. et S.A. Changnon, 1981: On the "best" temperature and precipitation normals: the Illinois situation. *Journal of Applied Meteorology*, 20:1383–1390.
- Matheron, G., 1973: The intrinsic random functions and their applications. *Advances in Applied Probability*, 5:207–221.
- Rao, G.A., S.V. Datar et H.N. Srivastava, 1992: Study of drought indices in relation to rice crop production over some States of India. *Mausam*, 43(2):169–174.
- Srivastava, A.K., P. Guhathakurta et S.R. Kshirsagar, 2003: Estimation of annual and seasonal temperatures over Indian stations using optimal normals. *Mausam*, 54:615–622.
- Tukey, J.W., 1977: *Exploratory Data Analysis*. Reading, Massachusetts, Addison Wesley.
- Von Storch, H. et F.W. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Wilks, D.S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. San Diego, Academic Press.

CHAPITRE 5. MÉTHODES STATISTIQUES D'ANALYSE DE JEUX DE DONNÉES

5.1 INTRODUCTION

On introduit dans le présent chapitre des concepts et des méthodes statistiques à la disposition des climatologues, sans cependant fournir de détails précis sur les sujets complexes. Certaines méthodes statistiques font donc l'objet d'un simple survol et d'autres ne sont pas traitées du tout. Le lecteur pourra se référer aux publications et manuels de statistiques indiqués à la fin du chapitre pour approfondir le sujet. À cet égard, *Quelques méthodes de l'analyse climatologique* (OMM-N° 199) et *Sur l'analyse statistique des séries d'observations* (OMM-N° 415) sont deux ouvrages que tout climatologue devrait posséder. Il appartient aussi aux climatologues de se tenir au courant des techniques actuelles ayant des applications pratiques dans leur domaine, car des méthodes statistiques et analytiques ne cessent de voir le jour ou de s'améliorer.

L'utilisation des données tirées des observations météorologiques et climatologiques n'a pas pour objectif principal de décrire les données recueillies (voir le chapitre 4), mais d'en déduire, à partir d'une représentation restreinte (l'échantillon de données étudié), les éléments physiques complexes qui présentent un intérêt pour les utilisateurs de l'information climatologique. L'interprétation des données climatologiques comprend généralement des comparaisons à la fois spatiale et temporelle des caractères que présentent les distributions de fréquences. Ces comparaisons sont effectuées pour répondre à des questions courantes du type:

- Les températures moyennes relevées au cours d'une période bien précise à des emplacements différents sont-elles identiques?
- La variabilité des précipitations est-elle la même à des emplacements différents?
- L'amplitude diurne de la température mesurée à un emplacement donné évolue-t-elle avec le temps et, dans ce cas, comment évolue-t-elle?
- Quelle est la probabilité pour que des tempêtes tropicales se produisent dans une région donnée?

Les inférences se fondent directement sur la théorie des probabilités, et l'emploi de méthodes statistiques pour parvenir à ces déductions relève donc du raisonnement mathématique. La statistique peut être définie comme étant une science pure et appliquée permettant de créer, d'élaborer et d'appliquer un ensemble de techniques destinées à évaluer le caractère incertain des inférences relevant d'une logique inductive. Elle sert à combler le fossé entre les données brutes et l'information utile; on l'emploie pour analyser les données et les modèles du climat et pour prévoir le climat. Grâce aux méthodes statistiques, il est possible d'établir la confiance à accorder à une décision en fonction des procédures appliquées.

La confiance qui peut être accordée à une décision est importante en raison des risques qu'on peut associer au fait de prendre la mauvaise décision. Les données tirées des observations ne fournissent qu'un échantillon du système physique que représentent le climat et le temps et présentent généralement des erreurs. Les conclusions qu'on peut dresser seront exactes ou inexactes. Il est donc nécessaire de rechercher des facteurs quantitatifs qui décrivent la confiance à placer dans les décisions pour utiliser à bon escient l'information que contiennent les jeux de données.

5.2 HOMOGÉNÉISATION

L'analyse des données sur le climat destinée à discerner les variations et les tendances gagne en fiabilité quand les jeux de données utilisés sont homogènes. Par jeu de données homogène, on entend un jeu de données dans lequel toutes les fluctuations de la série chronologique traduisent les variations réelles de l'élément climatique représenté. La plupart des méthodes statistiques partent du principe que les données examinées sont autant que possible exemptes d'erreurs d'instruments, de codage ou de traitement et d'autres erreurs non météorologiques et non climatologiques. Pourtant, les données météorologiques ou climatologiques ne sont en général ni homogènes ni exemptes d'erreurs. Il s'agit aussi bien d'erreurs systématiques (qui altèrent un ensemble complet d'observations de la même façon, par exemple dans le cas d'erreurs constantes d'étalonnage d'instruments ou de fautes de conversion d'unités) que d'erreurs aléatoires (toute observation pouvant faire l'objet d'une erreur aussi probablement positive que négative, comme dans le cas d'écart de parallaxe quand des observateurs différents lisent la mesure fournie par un baromètre à mercure).

La meilleure manière de veiller à l'homogénéité des relevés consiste à éviter les modifications en ce qui concerne la collecte, la manipulation, la transmission et le traitement des données. Il est fortement conseillé de modifier le moins possible les pratiques et les instruments d'observation (voir la publication intitulée *Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks: GSN and GUAN* (WMO/TD-No. 1106), 3.4). Malheureusement, la plupart des longues séries climatologiques sont altérées par plusieurs facteurs qui ne sont pas liés aux phénomènes climatiques de grande échelle. On peut citer notamment les changements de lieux géographiques; les modifications touchant l'affectation et la couverture des sols à l'échelle locale; le remplacement d'un type d'instrument par un autre, les changements d'exposition des instruments, le remplacement de leurs supports ou des abris; les modifications touchant les pratiques d'observation; les changements de méthodes de calcul, de codes et d'unités; ou encore les événements historiques et politiques. Certains changements peuvent entraîner des ruptures soudaines de l'homogénéité (par exemple après un changement d'instrument ou d'emplacement), tandis que d'autres peuvent causer une distorsion graduelle (résultant, par exemple, de l'urbanisation croissante dans le voisinage d'une station). Dans les deux cas, les séries chronologiques touchées perdent leur homogénéité, ce qui peut fausser l'évaluation des tendances climatiques. Il faut noter que les changements d'emplacement n'affectent pas toujours les observations de tous les éléments, et que les éléments observés n'ont pas tous la même sensibilité aux changements. L'intérêt de disposer de relevés homogènes découle principalement de la nécessité de bien discerner les variations propres aux phénomènes climatiques à grande échelle. Le fait que des séries de données comprennent certaines «inhomogénéités» présente par contre un intérêt pour les études portant, par exemple, sur les effets de l'urbanisation sur le climat local ou les effets de la croissance végétale sur le microclimat d'un écosystème.

Pour examiner l'homogénéité d'une série de données, il convient d'utiliser des tests statistiques en tenant compte des métadonnées dont on dispose. Quand on dispose de l'historique détaillé d'une station et que des mesures ont été conduites parallèlement lors d'un changement d'emplacement ou d'instrument, l'homogénéisation pourra se fonder sur ces éléments d'information à la fois qualitatifs et quantitatifs. L'archivage de toutes les métadonnées historiques est donc essentiel pour qu'il soit possible de parvenir à homogénéiser des séries chronologiques de données climatologiques; c'est un élément dont tous les Services météorologiques doivent se préoccuper (voir les chapitres 2 et 3).

Après l'analyse des métadonnées, les tests statistiques peuvent faire apparaître des manques d'homogénéité supplémentaires. Les tests à utiliser sont généralement fonction de l'échelle de temps propre aux données; ils seront différents selon qu'il s'agit de données quotidiennes, de données mensuelles ou de données relevées suivant d'autres échelles temporelles. Il faut revérifier les résultats de ce type de procédures d'homogénéisation statistiques à l'aide des métadonnées à disposition. En principe, il est possible d'utiliser tout test statistique permettant de comparer un paramètre statistique entre deux échantillons de données. Toutefois, on a en général recours à des tests spéciaux d'homogénéité qui vérifient en une fois l'intégralité de la série chronologique. Les tests aussi bien non paramétriques (selon lesquels aucune hypothèse n'est formulée au sujet des distributions statistiques) que paramétriques (selon lesquels la distribution de fréquence est connue ou correctement supposée) donnent de bons résultats.

Pour choisir un test d'homogénéité, il importe avant tout de se fier à la forme de la distribution de fréquence des données. Pour certains jeux de données, il s'agira d'une distribution en cloche (normale ou gaussienne); une méthode paramétrique donne alors de bons résultats. Dans d'autres cas (notamment pour ce qui concerne des données de précipitations provenant d'un lieu où la variabilité interannuelle est marquée), la courbe de distribution prend une autre forme et les tests non paramétriques portant sur les rangs peuvent se révéler plus appropriés. Pour évaluer le degré de confiance qu'on peut accorder aux résultats d'un test donné, il y a lieu de tenir compte aussi des effets de l'autocorrélation, du nombre de points d'inflexion potentiels dans une série (signalés ou non par les métadonnées), des tendances et des oscillations ainsi que des périodes courtes de relevés pouvant constituer des anomalies.

De nombreuses méthodes se fondent sur la comparaison des données à homogénéiser (la série à traiter) avec celles d'une série de référence. Théoriquement, cette série de référence doit refléter le même ensemble d'influences climatiques de grande échelle que la série à traiter, sans avoir pu subir cependant les mêmes erreurs potentielles et artificielles. Si la série à traiter est homogène et qu'on soumet les deux séries à une comparaison par différence (cas d'éléments mesurés à l'aide d'une échelle d'intervalle, comme la température) ou par calcul de rapports ou du logarithme des rapports (cas d'éléments mesurés à l'aide d'une échelle proportionnelle, comme les précipitations), la série chronologique résultante ne fera apparaître aucun changement brusque ni aucune tendance, mais elle oscillera autour d'une valeur constante. Toutefois si la série à traiter contient une ou plusieurs ruptures d'homogénéité, celles-ci apparaîtront dans les séries découlant de l'un ou l'autre type de comparaison. La figure 5.1 fournit un exemple de courbe présentant une série à traiter et une série de référence, tandis que la figure 5.2 propose une série résultant d'une comparaison par différence faisant apparaître une rupture d'homogénéité dans la série à traiter.

Le recours à une série chronologique de référence donne de bons résultats lorsque le jeu de données comprend des valeurs en nombre suffisamment grand pour que la relation climatologique s'ajuste bien entre les emplacements dont les séries sont à traiter et les emplacements dont les séries servent à établir la série de référence et que toutes les stations ou les valeurs dont on dispose, ou en tous cas la plupart d'entre elles, ne présentent pas de problèmes d'homogénéité. En général, plus la variabilité spatiale de l'élément climatique ou

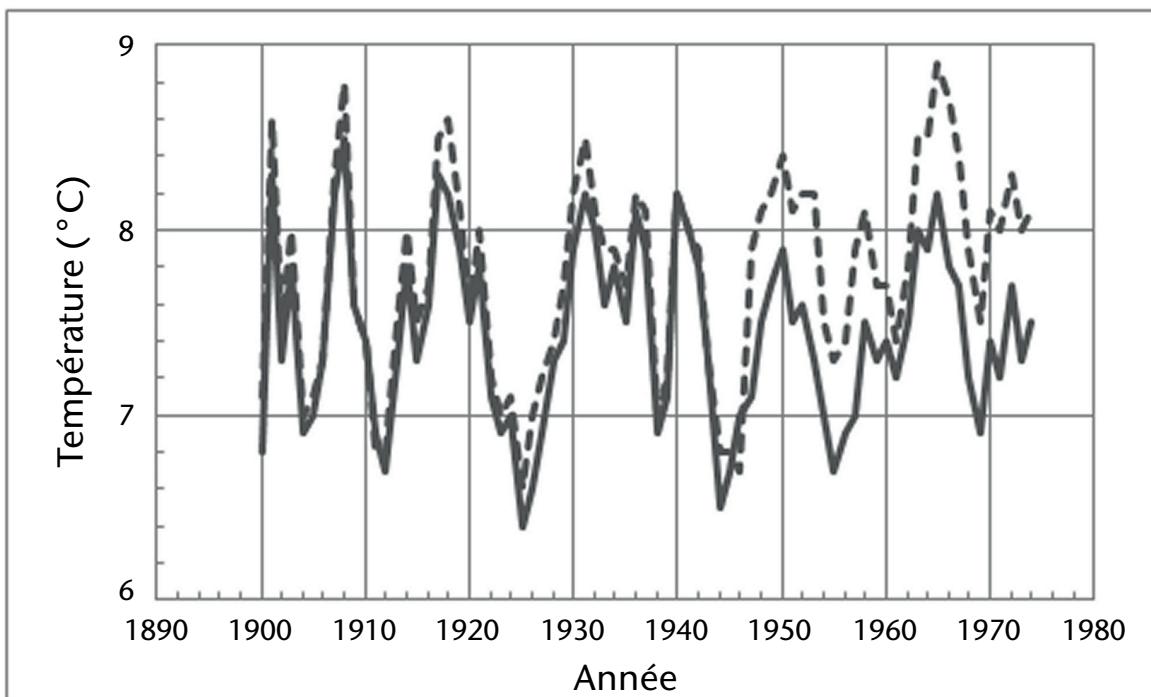


Figure 5.1. Exemple de courbes juxtaposées d'une série à traiter (ligne tiretée) comparée à une série chronologique de référence (ligne continue)

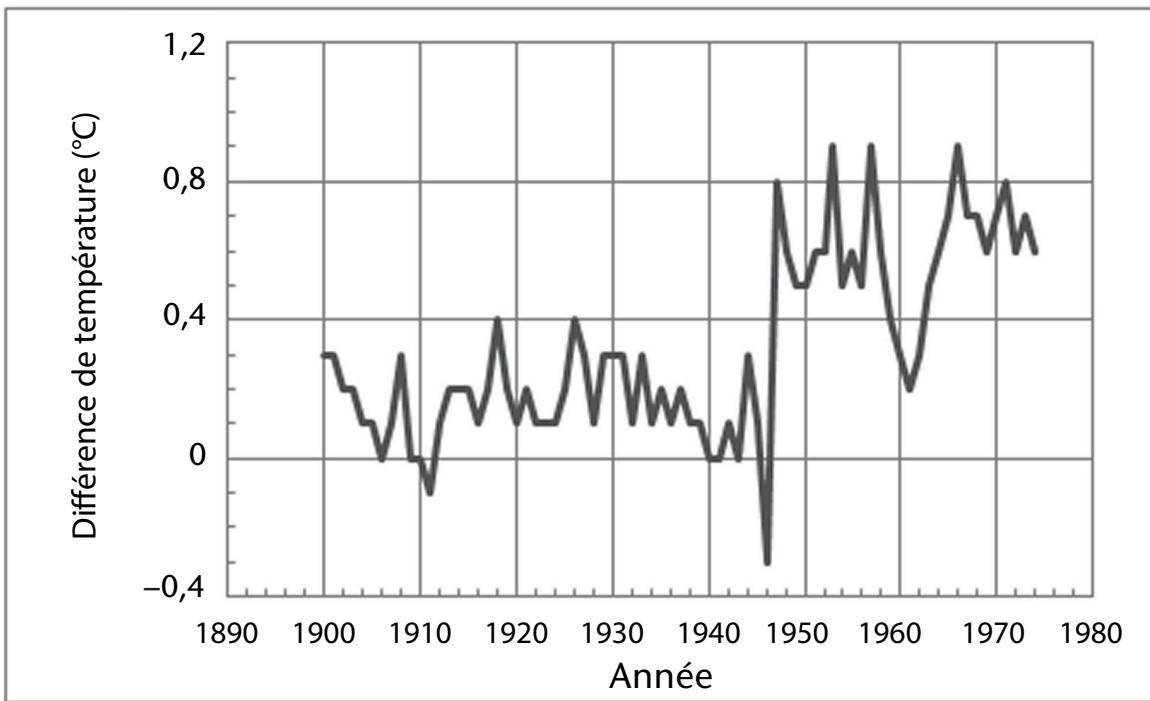


Figure 5.2. Exemple de courbe de différence

du type de climat est grande et plus le réseau d'observation doit être dense (par exemple il faut davantage de points de données pour les précipitations que pour la température, et davantage aussi pour homogénéiser des données de température quand les conditions de température sont très variables que dans la situation inverse). Lorsque les instruments ont tous été remplacés à peu près au même moment au sein d'un réseau, établir une série de référence est inutile, puisque tous les points de données montreront les mêmes variations. S'il est impossible d'établir une série de référence, il faut alors évaluer des points d'inflexion et des facteurs de correction éventuels sans avoir recours aux données des stations voisines.

Les courbes des doubles cumuls sont souvent employées en hydrométéorologie pour vérifier les mesures des précipitations et de l'écoulement, mais on peut aussi se servir de cette méthode pour la plupart des éléments. Il s'agit de pointer sur un graphique les valeurs successives cumulées de la série à traiter en regard des valeurs cumulées correspondantes de la série de référence pour chaque période. Si le rapport entre la série étudiée et la série de référence demeure constant dans le temps, la courbe des doubles cumuls présente alors une pente constante. Toute variation importante de la pente ou de la forme de la courbe indique un changement dans le rapport entre les deux séries. Étant donné que de telles variations peuvent se produire naturellement, il est conseillé de vérifier si les changements apparents de la pente s'opèrent sur une période continue et bien définie d'au moins cinq ans et s'ils sont confirmés par des événements signalés par les métadonnées de la station avant de conclure à un manque d'homogénéité. La figure 5.3 reprend les données déjà utilisées dans les figures 5.1 et 5.2 présentées sous la forme d'une courbe des doubles cumuls. Comme il est souvent difficile de déterminer à quel endroit la pente d'une courbe des doubles cumuls présente une cassure, on construit une courbe de résidus à partir des différences cumulées entre les données de la station étudiée et celles de la station témoin en fonction du temps (figure 5.4). La courbe des résidus montre plus clairement la rupture de pente. Il est possible d'utiliser la courbe des doubles cumuls pour faire apparaître des changements de proportionnalité survenant plus d'une fois pendant la période considérée. Quand une courbe des doubles cumuls révèle une rupture de pente, il est possible de calculer des facteurs de correction en calculant le rapport des deux pentes avant et après le point d'inflexion.

Il existe plusieurs tests de stationnarité (hypothèse selon laquelle les caractères d'une série chronologique ne varient pas avec le temps). L'un d'entre eux est le test des suites (ou séquences), qui prend pour hypothèse que les tendances et autres formes de persistance propres

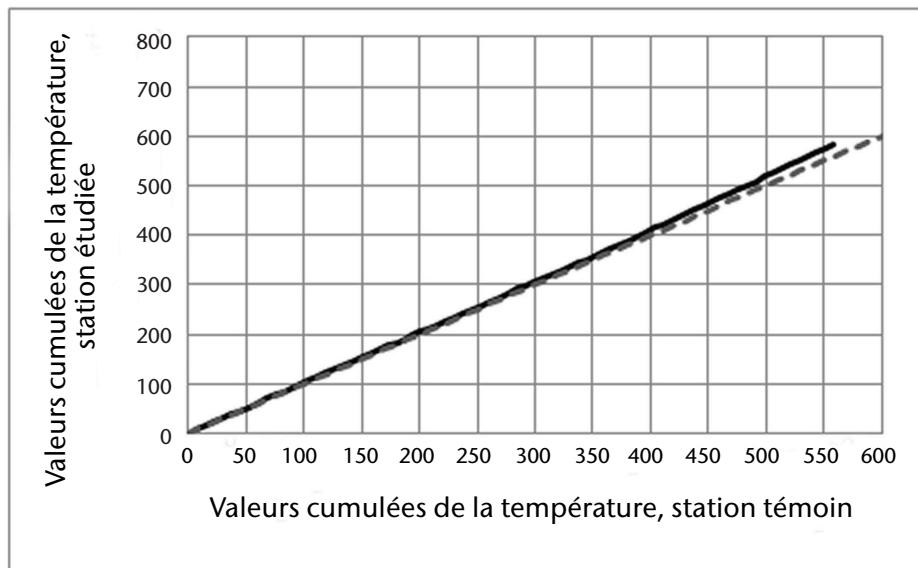


Figure 5.3. Exemple de courbe des doubles cumuls, la pente tiretée étant égale à 1

à une série d'observations se produisent de façon aléatoire. Il se fonde sur l'observation, dans les valeurs consécutives de la variable, du nombre total des suites affectées d'un signe ou de l'autre. Un nombre trop faible de ces suites indique une persistance ou une tendance, tandis qu'un nombre trop élevé indique des oscillations. Le caractère stationnaire des tendances centrales et de la variabilité entre les parties de la série est important. Les techniques visant à examiner ces caractères comprennent des méthodes paramétriques et des méthodes non paramétriques.

Lorsque les données présentent une résolution inférieure au mois, notamment dans les séries d'observations quotidiennes ou horaires, l'homogénéisation des extrêmes nécessite un surcroît de précaution. Peu importe comment on les définit, les extrêmes sont des données qu'on enregistre rarement, mais qui traduisent souvent le fait qu'un ensemble de conditions atmosphériques particulières se sont produites. Si les points de données extrêmes sont relativement peu nombreux pour l'analyse, il peut se révéler difficile de déterminer comment ajuster ces données pour homogénéiser ces conditions uniques. Il faut considérer que les extrêmes font partie intégrante du jeu de données et qu'il ne faut donc pas les homogénéiser

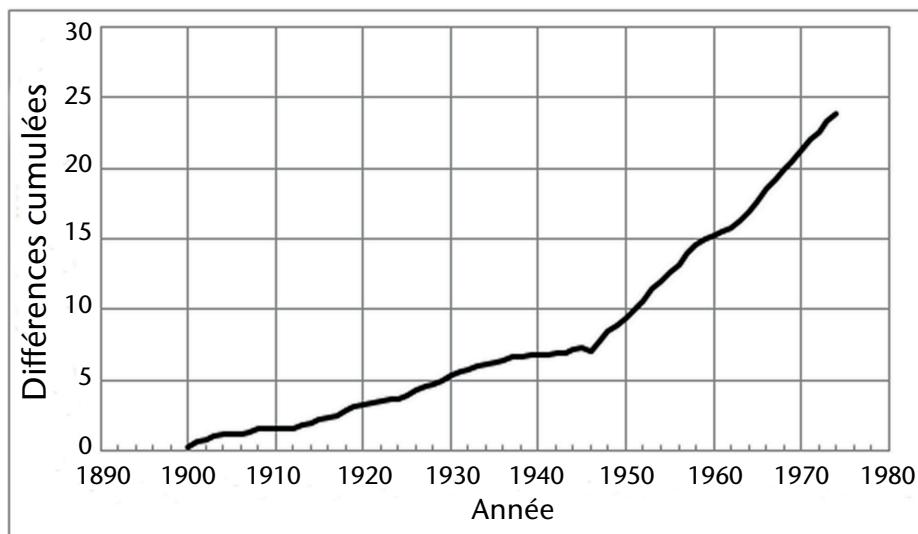


Figure 5.4. Exemple de courbe de cumul des résidus

séparément. Alors que les techniques utilisées pour homogénéiser les données de la température mensuelle, saisonnière ou annuelle donnent en général satisfaction, l'homogénéisation des données et des extrêmes quotidiens demeure complexe.

Certes il existe de nombreuses techniques objectives pour déceler les problèmes d'homogénéité et ajuster les données en conséquence, mais l'application de telles techniques n'en demeure pas moins subjective. La décision même d'appliquer ou non une de ces techniques est déjà subjective. Il en découle que des tentatives indépendantes d'homogénéisation pourront aisément aboutir à des données complètement différentes. Il importe donc de bien consigner tous les détails de chacune des étapes franchies et des décisions prises au cours du processus. Il ne faudrait pas considérer qu'une fois ajustées, les données sont nécessairement «correctes», ni penser que les données originales sont systématiquement «fausses». Il faut veiller à toujours conserver ces données originales.

Les techniques d'évaluation de l'homogénéité et d'ajustement des données sont un domaine dans lequel les outils, tant théoriques que pratiques, ne cessent d'évoluer. L'analyste devra donc s'efforcer de se tenir au courant de cette évolution.

5.2.1 Évaluation de données homogénisées

L'évaluation des résultats du repérage et de l'ajustement des données non homogènes demande du temps, mais elle est incontournable, quelle que soit la méthode qui a été employée. Il importe de bien comprendre les facteurs d'ajustement qui ont été appliqués aux données pour améliorer la fiabilité de la série chronologique et rendre les mesures comparables sur toute l'étendue de cette série. Il faudra parfois faire appel à des techniques conçues pour un autre ensemble de circonstances (un autre climat, un autre élément météorologique ou climatologique, une autre densité de réseau, etc.); aussi importe-t-il d'analyser dans quelle mesure l'homogénéisation a bien fonctionné. À titre d'exemple, la plupart des techniques utilisées pour homogénéiser les données mensuelles ou annuelles des précipitations ont été conçues et validées pour des climats pluvieux présentant des précipitations tout au long de l'année. Elles pourraient donc révéler de graves insuffisances si on les appliquait à des données recueillies sous des climats comprenant des saisons très sèches.

Pour évaluer les corrections apportées, il est possible de comparer les données corrigées et celles qui ne l'ont pas été avec une information indépendante, notamment des données provenant de pays voisins, des jeux de données aux points de grille, ou encore des relevés indirects comme ceux issus d'études phénologiques, des registres d'observation ou des dates de gel et de dégel. Quand on utilise de telles techniques, il ne faut pas oublier cependant qu'elles aussi présentent des limites. Dans le cas des données aux points de grille, par exemple, le jeu de données peut être altéré par des variations du nombre de stations au fil du temps; il se peut aussi qu'un point de la grille présente une mauvaise corrélation avec les données originales d'une station située sur le lieu même ou à proximité.

Une autre méthode consiste à examiner, dans une série chronologique de moyennes par zones à l'échelle d'un pays, les données corrigées et celles qui ne l'ont pas été pour voir si la procédure d'homogénéisation a modifié les tendances prévues, compte tenu de ce qu'on sait du réseau de stations. Lorsque, par exemple, des observations exécutées l'après-midi ont été remplacées à grande échelle par des observations exécutées le matin, la série chronologique des données sur la température non corrigées comporte une erreur qui tend à abaisser les valeurs, puisque les observations effectuées le matin donnent en général des températures inférieures à celles relevées l'après-midi.

Une fois les résultats de l'homogénéisation validés, la nouvelle série chronologique obtenue fournira, dans son ensemble, une description des variations temporelles de l'élément analysé de meilleure qualité que les données originales ne l'auraient fait. Certaines valeurs isolées pourront cependant demeurer fausses ou, pire encore, l'erreur qu'elles comportent pourra avoir été aggravée par l'homogénéisation. On trouvera des descriptions bien plus complètes de

plusieurs tests largement utilisés dans la publication intitulée *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186), 3.4, tableau 4, et dans plusieurs autres ouvrages cités à la fin du présent chapitre.

5.3 AJUSTEMENT DE MODÈLES POUR ÉVALUER LES DISTRIBUTIONS DE DONNÉES

Une fois qu'on a pu corriger les jeux de données pour éliminer les erreurs et tout manque d'homogénéité qu'on y a décelés, il convient de faire coïncider avec les distributions de fréquences observées des modèles de distributions statistiques décrits dans la section 4.4.1, de manière à pouvoir en tirer parti à l'aide de méthodes statistiques. Il est possible en effet d'ajuster une distribution de fréquence théorique aux données en y insérant les estimations des paramètres de la distribution, ces estimations étant calculées à partir d'échantillons des données d'observation. Les estimations peuvent se fonder sur des quantités variables d'informations ou de données. Le degré de liberté désigne le nombre d'éléments d'information ou de données indépendants qui sont utilisés dans l'estimation des paramètres d'une distribution. En général plus le nombre de degrés de liberté est grand et meilleure sera l'estimation. En pointant les données sur la courbe théorique lissée, on peut procéder à une évaluation graphique du degré de concordance entre la courbe et les données.

L'examen des résidus est un outil performant pour comprendre les données et proposer les modifications qu'il convient d'apporter au modèle ou aux données. Le résidu est la différence entre la valeur observée et la valeur correspondante du modèle. Il n'est pas synonyme de valeur anormale. Une valeur anormale est une valeur atypique, inhabituelle ou unique figurant dans la série des données originales. Il est utile de représenter les résidus sur un graphique, pour faire apparaître des schémas de répartition particuliers. Si l'on découvre de tels schémas, par exemple des oscillations, des grappes ou des tendances, c'est en général que le modèle n'est pas bien adapté aux données. Les valeurs aberrantes (quelques résidus s'écartant fortement de la majorité des autres valeurs résiduelles) représentent des indicateurs de données qui peuvent être douteuses ou erronées. Dans les analyses qui suivront, elles seront considérées habituellement comme des extrêmes. Quand aucun schéma n'apparaît et que les points des résidus semblent répartis de façon aléatoire, on peut alors accepter le fait que le modèle s'ajuste bien aux données.

Quand il s'agit d'ajuster un modèle statistique à la distribution de fréquence d'une série d'observations, la validité des hypothèses sur lesquelles reposent le modèle et le processus d'ajustement doit être avérée. Pour la plupart des modèles, on part de l'hypothèse que les données sont indépendantes (une observation n'est pas tributaire d'une autre quelconque observation). La plupart des méthodes comparatives qui vérifient l'ajustement d'un modèle posent comme hypothèse que les erreurs sont réparties de façon aléatoire et indépendante. Si les hypothèses ne sont pas exactes, alors toute déduction issue de l'analyse risque d'être fausse.

Une fois qu'on est parvenu à trouver une distribution de fréquence statistique qui s'ajuste bien aux données étudiées, en satisfaisant tous les critères d'échantillonnage indispensables (indépendance, caractère aléatoire, etc.), et que l'ajustement a été validé (voir 4.4), il est alors possible d'utiliser le modèle pour représenter les données. Les mathématiques permettent alors de procéder par inférence. Le modèle fournit une estimation de la tendance centrale, de la dispersion et des propriétés d'ordre supérieur de la distribution (asymétrie ou aplatissement, par exemple). Il est également possible de déterminer la confiance qui peut être accordée au fait que ces estimations portant sur un échantillon offrent une bonne représentation des conditions physiques réelles. En appliquant des techniques de probabilité et de statistique à la distribution de fréquence modélisée, il est possible d'obtenir des estimations relatives à d'autres caractéristiques telles que la probabilité qu'une observation dépasse une valeur donnée. Toutes ces opérations se révèlent bien plus difficiles, voire impossibles, à réaliser lorsqu'on se sert des données originales et non de la distribution de fréquence qui a pu leur être ajustée.

5.4 TRANSFORMATION DE DONNÉES

On utilise beaucoup la loi normale ou de Gauss, car elle a fait l'objet de nombreuses études en statistiques. Quand la distribution des données n'est pas conforme à la loi normale, il est intéressant de procéder à une transformation des données pour que leur distribution s'approche de cette loi, compte tenu des nombreuses possibilités d'inférence qu'offre cette dernière. Il faut procéder avec circonspection pour qu'une fois transformées, les données continuent effectivement de représenter les mêmes processus physiques que les données originales et qu'on puisse ainsi en tirer des conclusions fondées.

Il existe plusieurs façons de savoir si la distribution d'un élément s'éloigne de la loi normale. Il est relativement facile de procéder à un examen visuel d'une représentation graphique, notamment un histogramme, un diagramme de dispersion, un diagramme probabilité-probabilité (P-P) ou un diagramme quantile-quantile (Q-Q). Pour rechercher davantage d'objectivité dans l'évaluation, les techniques à employer vont du simple examen de l'asymétrie et de l'aplatissement (voir 4.4.4 et 4.4.5) d'une courbe de distribution à des tests de normalité proposant des inférences.

Avant de procéder à une transformation, l'analyste doit s'assurer qu'il existe une raison valable pour laquelle la distribution des données ne correspond pas à la loi normale. Des raisons non valables sont par exemple des erreurs dans la saisie des données ou des valeurs manquantes qui n'ont pas été signalées. La présence de valeurs aberrantes peut aussi constituer une raison non valable, puisqu'elles peuvent très bien représenter une partie correspondant à la réalité dans une distribution normale.

Les transformations les plus usuelles visant à normaliser les données sont les suivantes: la racine carrée, la racine cubique, la transformation logarithmique et la transformation inverse. La racine carrée rend les valeurs inférieures à 1 relativement plus grandes et les valeurs supérieures à 1 relativement plus petites. Quand les valeurs peuvent être soit positives soit négatives, il faut y ajouter une constante pour qu'elles soient toutes supérieures ou égales à 0 avant d'en calculer la racine carrée. La racine cubique a un effet analogue, mais ne nécessite pas de décaler les données pour éliminer les valeurs négatives. Les transformations logarithmiques compriment l'étendue des valeurs en diminuant les valeurs relativement élevées et en augmentant les valeurs relativement basses. Il faut d'abord ajouter une constante aux valeurs si certaines d'entre elles sont inférieures ou égales à 0. Par une transformation inverse, les valeurs les plus faibles deviennent très grandes et inversement; il faut aussi éviter les valeurs nulles.

Ces transformations sont décrites dans l'ordre relatif de leur puissance, de la plus faible à la plus forte. Le mieux consiste à parvenir à normaliser les données en les transformant le moins possible. Quand un élément météorologique ou climatique se caractérise intrinsèquement par une distribution de fréquence très éloignée de la loi normale, notamment la distribution en U des données sur la nébulosité ou sur l'insolation, il n'existe pas de transformation simple qui puisse normaliser les données.

Toutes les transformations compriment davantage le côté droit d'une distribution que son côté gauche; elles réduisent davantage les valeurs élevées qu'elles n'augmentent les valeurs basses. Elles donnent donc de bons résultats avec les distributions qui présentent une asymétrie positive, notamment dans le cas de données sur les précipitations et sur la vitesse du vent. Quand une distribution présente une asymétrie négative, on inverse l'asymétrie (les valeurs sont multipliées par -1 et on y ajoute une constante pour que toutes les valeurs soient supérieures à 0) avant d'appliquer la transformation, puis on l'inverse de nouveau pour retrouver l'ordre d'origine des données sur l'élément étudié.

Les transformations de données présentent de nombreux avantages, mais il convient d'y avoir recours à bon escient et d'une manière éclairée. Toutes les transformations décrites ci-dessus ont pour but de normaliser les données en réduisant leur espace relatif à la droite de la distribution davantage qu'à la gauche de la distribution. Le fait même d'altérer les distances relatives entre les points de données, ce que ces transformations visent pour normaliser les données, soulève cependant des questions quant à l'interprétation des données. Tous les points de données demeurent dans l'ordre relatif qui était le leur avant la transformation, ce qui permet

une interprétation des résultats portant sur l'accroissement des valeurs de l'élément. Il est cependant probable que les distributions transformées se révèlent plus complexes à interpréter du point de vue physique, compte tenu de la nature curviligne des transformations. C'est donc avec discernement que l'analyste devra interpréter des résultats fondés sur des données transformées.

5.5 ANALYSE DE SÉRIES CHRONOLOGIQUES

Les mêmes principes régissent l'ajustement de modèles (voir 5.3) et l'analyse de séries chronologiques. Un modèle est ajusté à la série de données; il peut s'agir d'un modèle linéaire, curviligne, exponentiel, périodique ou correspondant à toute autre fonction mathématique. C'est en général en se servant de la méthode des moindres carrés (qui consiste à minimiser la somme des carrés des distances des points par rapport à la courbe d'ajustement) qu'on obtient le meilleur ajustement (celui qui minimise les différences entre les données de la série étudiée et le modèle choisi). On examine les résidus de l'ajustement pour en tirer des configurations spatiales particulières et si c'est le cas, le modèle est ajusté pour en tenir compte.

Pour analyser les séries chronologiques en climatologie, on a recours à diverses techniques qui décomposent les séries en leurs composantes en fonction du temps ou de la fréquence. La stationnarité (caractère d'une série dont la moyenne et la variance ne varient pas sur toute son étendue) constitue une hypothèse de première importance pour ces modèles. C'est une condition à laquelle les données climatologiques ne se conforment pas en général, même quand elles sont homogènes (voir 5.2).

Les analyses de Gabor et par ondelettes sont des prolongements de l'analyse spectrale classique. En modélisant des sous-intervalles des séries chronologiques suivant différentes échelles ou résolutions, on lève partiellement la condition de stationnarité. Ces types d'analyse réussissent particulièrement bien à représenter des séries chronologiques dont les sous-intervalles présentent des caractères différents. Les analyses par ondelettes donnent de bons résultats sur des séries chronologiques présentant des pics et des ruptures marquées. En comparaison des techniques classiques, elles sont particulièrement bien adaptées aux signaux dont l'amplitude et la fréquence varient dans le temps. Parmi leurs principaux avantages, ces analyses «locales» offrent la possibilité de présenter les séries chronologiques des processus climatologiques suivant les coordonnées que sont la fréquence et le temps, et donc d'étudier et de visualiser l'évolution de divers modes de variabilité sur une longue période. On s'en sert non seulement pour mettre en évidence les échelles non stationnaires des variations, mais aussi comme outil d'analyse des données pour fournir une première interprétation concernant un jeu de données. Ces méthodes ont connu de nombreuses applications en climatologie, notamment dans les études du phénomène El Niño-oscillation austral (ENSO), de l'oscillation de l'Atlantique Nord, de la turbulence atmosphérique, des relations spatiotemporelles touchant les précipitations et des caractéristiques des vagues océaniques.

Ces méthodes présentent cependant certains inconvénients. En ce qui concerne l'analyse par ondelettes, la difficulté principale réside dans le fait qu'on peut se fonder sur une multitude de fonctions d'ondelettes et que les résultats varient souvent en fonction de l'ondelette qu'on aura sélectionnée. L'interprétation des résultats est donc délicate, puisqu'il est possible, à partir d'un même jeu de données, de parvenir à des conclusions différentes compte tenu de la fonction mathématique sélectionnée. Il importe, dans la sélection de la fonction d'ondelette, d'établir un lien plausible entre la fonction choisie et la réalité physique. Les analyses de Gabor et par ondelettes sont des champs d'études récents, et bien que le raisonnement mathématique soit bien défini, il se peut qu'on parvienne à l'avenir à perfectionner ces techniques et leurs méthodes d'application pour en atténuer les inconvénients.

L'autorégression et la moyenne mobile sont d'autres techniques usuelles d'analyse des séries chronologiques. Par autorégression, on entend la régression linéaire d'une valeur appartenant à une série chronologique par rapport à une ou plusieurs valeurs antérieures de cette série (autocorrélation). La méthode des moyennes mobiles exprime une série d'observations sous la forme d'une fonction d'une série aléatoire. Le modèle autorégressif à moyenne mobile (ARMA)

combine ces deux méthodes. Un modèle ARMA qui accepte un manque de stationnarité est un modèle autorégressif à moyenne mobile intégrée (ARIMA). Ces modèles de régression peuvent se révéler plus complexes que nécessaire et se traduire par un surajustement. On parle de surajustement quand un modèle épouse de trop près (différences minimales entre le modèle et les données) l'échantillon censé représenter un processus physique. Il peut se révéler plus judicieux de conserver un ajustement plus lâche, mais qui corresponde mieux à la réalité du processus. D'autres problèmes émanent de la non-stationnarité des paramètres utilisés pour définir le modèle, de résidus non aléatoires (indiquant un modèle incorrect) et de la périodicité inhérente aux données, mais qui n'est pas modélisée. Un moyen efficace de déceler un surajustement consiste à procéder à une validation du modèle par partition, c'est-à-dire à ne prendre qu'une partie des données disponibles pour la phase d'ajustement du modèle, puis de valider le modèle sur les données restantes qui n'ont pas servi à son élaboration.

Une fois qu'une courbe d'une forme acceptable modélise les données de la série chronologique et que l'ajustement est validé, les propriétés mathématiques qui y correspondent peuvent servir à faire des estimations auxquelles on ne pourrait parvenir à l'aide des données originales. On peut ainsi mesurer les tendances, l'évolution cyclique ou l'autocorrélation et la persistance, ou encore évaluer le degré de confiance de ces mesures.

5.6 ANALYSE MULTIDIMENSIONNELLE

Les jeux de données multidimensionnelles regroupent des observations de plusieurs éléments selon leur évolution dans le temps et/ou dans l'espace. On étudie souvent ce type de jeux de données pour de multiples raisons. Les principales sont les suivantes: déterminer si un jeu de données complexe peut être représenté par un moyen relativement simple, si les observations peuvent être rangées en groupes qui peuvent être classés et si divers éléments présentent une interdépendance. Ces jeux de données servent aussi à tester des hypothèses au sujet des données. L'ordre des observations n'entre en général pas en ligne de compte dans les analyses multidimensionnelles. Les séries chronologiques de plus d'un élément sont habituellement considérées comme un sujet d'analyse à part entière, notamment avec des techniques comme l'analyse spectrale croisée.

L'analyse en composantes principales, qu'on appelle parfois analyse des fonctions orthogonales empiriques, est une technique qui permet de réduire les dimensions des données multidimensionnelles. Ce processus, largement utilisé dans l'analyse des données climatologiques, simplifie les jeux de données complexes. Grâce à cette méthode, on décompose plusieurs observations corrélées en un nouvel ensemble de fonctions (orthogonales) sans corrélation qui contiennent la variance originale des données. Ces fonctions orthogonales empiriques, qu'on appelle donc aussi composantes principales, sont ordonnées de manière à ce que la première composante soit celle qui explique le mieux la variance, la deuxième expliquant la deuxième portion la plus grande de la variance et ainsi de suite. Comme il suffit de quelques composantes en général pour expliquer la variance, la méthode réduit efficacement le «bruit» émanant d'un champ d'observation. Souvent, chaque composante peut être reliée à un élément météorologique ou climatologique en particulier. On utilise ainsi cette méthode pour analyser une diversité de champs, notamment les températures de surface de la mer, les régimes de température et de précipitations à la surface des terres émergées à l'échelle régionale, les chronologies fondées sur les cernes de croissance des arbres, la pression au niveau de la mer, les polluants atmosphériques, les propriétés radiatives de l'atmosphère et les scénarios climatiques. On s'est aussi servi des composantes principales en tant qu'outil de reconstitution du climat, notamment pour représenter un élément climatique suivant une grille spatiale à l'aide de données indirectes quand on ne dispose pas d'observations pour cet élément.

L'analyse factorielle réduit un grand ensemble d'observations à un ensemble plus petit de facteurs. La différence par rapport à l'analyse en composantes principales, c'est que les facteurs ne sont pas sans corrélation. Étant donné qu'un facteur peut représenter les observations de plus d'un élément, son interprétation se révèle souvent ardue du point de vue météorologique ou climatologique. La méthode est surtout utilisée dans les études de climatologie synoptique.

L'analyse de groupements ou analyse typologique consiste à répartir les observations en groupes dont les caractères sont analogues. Pour former de tels groupes, on dispose de nombreuses méthodes, et différentes méthodes s'appliquent suivant le schéma de répartition des points. La plupart des méthodes se basent cependant sur la mesure dans laquelle la distance entre les moyennes de deux groupes est plus grande que la distance moyenne au sein d'un groupe. Il n'est pas indispensable que ce soit une distance euclidienne, mais elle doit obéir à certains critères. Un premier critère est celui selon lequel la distance entre le point A et le point B est égale à la distance entre le point B et le point A (symétrie). Un deuxième critère indique que la distance doit avoir une valeur positive (non-négativité). Un troisième critère détermine que pour trois points formant un triangle, la longueur d'un des côtés du triangle doit être inférieure ou égale à la somme des longueurs des deux autres côtés (inégalité triangulaire). Un quatrième critère précise que si la distance entre A et B est nulle, alors A et B représentent le même point (détermination). La plupart des techniques répartissent de façon itérative les données en un nombre de groupes de plus en plus grand, si bien que l'analyste doit donc déterminer à quel moment le nombre de groupes est suffisant. Il n'existe malheureusement aucune règle objective pour l'aider à prendre cette décision. L'analyste doit donc se fonder sur ses connaissances et sa propre expérience pour décider du moment où il aura obtenu un nombre de groupes satisfaisant sur le plan météorologique ou climatologique. L'analyse de groupements est utilisée à diverses fins, notamment pour former des régions homogènes par rapport aux précipitations, analyser des climatologies synoptiques et prévoir la qualité de l'air en milieu urbain.

L'analyse des corrélations canoniques vise à déterminer l'interdépendance entre deux groupes d'éléments. La méthode recherche une combinaison linéaire de la distribution du premier élément qui produise une corrélation avec la distribution du second. Cette combinaison linéaire est extraite du jeu de données, et le processus est répété sur les résidus, avec pour contrainte qu'il n'y ait pas de corrélation entre la deuxième combinaison linéaire et la première. Le processus se répète jusqu'à ce que la combinaison linéaire ne soit plus significative. Cette analyse sert par exemple à établir des prévisions basées sur des téléconnexions, à procéder à une réduction d'échelle statistique (voir 6.3.5), à déterminer des régions homogènes pour la prévision des crues dans un bassin non jaugé ou à reconstruire une répartition spatiale du vent à partir de champs de pression. La décomposition en valeurs singulières est une méthode d'analyse analogue qui peut aussi être envisagée. Elle consiste, tout comme l'analyse des corrélations canoniques, à chercher des combinaisons linéaires des deux groupes d'éléments de telle sorte que ces combinaisons permettent d'obtenir la plus grande covariance possible.

Toutes ces méthodes sont fondées sur des hypothèses et comportent des inconvénients. L'interprétation des résultats obtenus repose beaucoup sur les hypothèses qui se vérifient et sur l'expérience de l'analyste. D'autres méthodes, comme la régression multiple ou l'analyse de covariance, présentent encore plus de restrictions pour les données météorologiques ou climatologiques. L'analyse multidimensionnelle est complexe; compte tenu du grand nombre de résultats possibles, il y a lieu de l'appliquer avec prudence.

5.7 ANALYSE COMPARATIVE

En adaptant la fonction d'un modèle aux données, qu'il s'agisse d'une distribution de fréquence ou d'une série chronologique, il est possible de se fonder sur les caractères du modèle pour poursuivre l'analyse. Comme en général les propriétés des caractères du modèle ont déjà été vérifiées, il est possible d'en tirer toute une série de conclusions. Quand les caractères du modèle n'ont pas été approfondis, il peut être utile d'avoir recours au bootstrap (méthode d'autoamorçage). Le bootstrap est une méthode statistique permettant d'estimer les caractères d'un modèle à partir d'un grand nombre d'échantillons tirés de façon aléatoire de la série des observations originales. On l'utilise en remplacement d'inférences tirées d'hypothèses paramétriques, lorsqu'on a des doutes sur les hypothèses, que l'inférence paramétrique se révèle impossible ou que l'inférence paramétrique exige le recours à des formules très complexes. Cette technique est simple à appliquer, mais elle peut masquer sa propre série d'hypothèses que d'autres méthodes mettraient mieux en évidence.

Il existe en particulier bon nombre de tests qui permettent de comparer les caractères de deux modèles et de déterminer ainsi quelle confiance on peut accorder dans le fait que les deux jeux de données modélisés partagent ces caractères. Quand on compare deux modèles, la première étape consiste à sélectionner les caractères sur lesquels la comparaison va porter. La comparaison peut ainsi porter sur la moyenne, la médiane, la variance ou la probabilité d'un évènement dans une distribution, ou encore la phase ou la fréquence si l'on prend en considération une série chronologique. En principe, tout caractère des modèles qu'il est possible de calculer peut faire l'objet d'une comparaison, mais il convient de se fonder sur une raison plausible (arguments physiques) pour procéder à une telle comparaison.

L'étape suivante consiste à formuler l'hypothèse nulle, c'est-à-dire une hypothèse jugée vraie avant de commencer un test quel qu'il soit et, dans ce cas, il s'agit généralement de l'hypothèse selon laquelle les caractères des modèles sont les mêmes. La contre-hypothèse est l'inverse: les caractères modélisés sont différents.

Il faut ensuite sélectionner un test bien adapté pour comparer les caractéristiques des deux modèles. Certains tests sont des tests paramétriques; ils reposent sur des hypothèses portant sur la distribution, notamment quant à sa normalité. Les tests paramétriques comprennent le test de Student (de comparaison des moyennes) et le test de Fisher (de comparaison des variances). Il existe aussi des tests non paramétriques qui ne posent pas d'hypothèses quant à la distribution. Ils comprennent les tests des signes (de comparaison des médianes) et le test de Kolmogorov-Smirnov (de comparaison des distributions). Les tests paramétriques sont en général plus fiables quant aux conclusions qu'on peut en tirer, à condition toutefois que les hypothèses relatives aux distributions se vérifient.

Le rejet d'une hypothèse vraie (ou l'acceptation d'une hypothèse fausse) s'exprime en fonction de sa vraisemblance par un niveau de confiance ou de probabilité. Le test sélectionné doit montrer si l'hypothèse nulle peut être acceptée pour un niveau de confiance requis. Certains tests font apparaître à quel niveau de confiance l'hypothèse nulle peut être acceptée. Si l'hypothèse nulle est rejetée, la contre-hypothèse doit être acceptée. En appliquant ce processus, l'analyste sera probablement en mesure de déclarer, par exemple, que les moyennes de deux jeux d'observations sont égales selon un niveau de confiance de 99 % et qu'il n'y a donc que 1 % de chances pour que les moyennes soient différentes.

Quelle que soit l'hypothèse acceptée, qu'il s'agisse de l'hypothèse nulle ou de la contre-hypothèse, la conclusion peut se révéler erronée. On appelle erreur de première espèce l'erreur consistant à rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie. On appelle erreur de seconde espèce l'erreur consistant à accepter l'hypothèse nulle alors qu'elle est fausse. Malheureusement, en réduisant le risque de première espèce, on augmente celui de seconde espèce, si bien qu'il est nécessaire de trouver un équilibre entre ces deux types d'erreurs. Cet équilibre devrait se baser sur la vraisemblance de l'un ou l'autre des deux types d'erreurs. Dans tous les cas, il est possible de calculer selon quelle probabilité la conclusion est plausible, ce qu'il y a lieu de consigner avec ladite conclusion.

5.8

LISSAGE

Les méthodes de lissage servent de trait d'union entre la méthode non paramétrique, selon laquelle aucune hypothèse fondée sur une structure explicite des données d'observation n'est posée, et la méthode paramétrique, selon laquelle des hypothèses très probables sont posées. En partant de l'hypothèse faible qu'une courbe lissée peut représenter la vraie distribution des données, l'analyste se donne la possibilité de faire apparaître un schéma de répartition sous-jacent. Le lissage augmente les signaux de régimes climatiques tout en réduisant le bruit découlant de fluctuations aléatoires. On utilise cette technique notamment pour procéder à une analyse exploratoire des données, élaborer des modèles, vérifier le bon ajustement d'une courbe (lissée) représentative par rapport aux données, procéder à une estimation paramétrique ou apporter des modifications à des méthodes normalisées.

L'estimation par noyau est une méthode de lissage (exemple: lissage par les moyennes mobiles, lissage gaussien ou lissage binomial). Les paramètres de lissage fournissent une estimation de la valeur en un point donné en associant les valeurs observées dans le voisinage de ce point. Pour cela, on a souvent recours à une moyenne pondérée, le coefficient de pondération étant fonction de la distance par rapport au point en question. On parle de fenêtre pour désigner l'étendue du voisinage, et plus cette fenêtre est large, plus le lissage est important. Les estimateurs à noyau d'une densité donnée sont simples, mais ils présentent des inconvénients. L'estimation peut être faussée quand la région de définition des données est bornée, notamment près du début et de la fin d'une série chronologique. En utilisant la même fenêtre pour l'ensemble de la courbe, c'est un degré de lissage constant qui est appliqué. L'estimation tend aussi à aplatiser les pics et les creux de la courbe de distribution des données. Pour améliorer cette méthode d'estimation par noyau, il est notamment possible de corriger les erreurs aux bornes en utilisant des noyaux particuliers uniquement près des bornes et en faisant varier les fenêtres dans les différentes parties de la distribution de données. Les transformations de données (voir 5.4) peuvent aussi apporter des améliorations.

Les estimateurs splines s'ajustent à une distribution de fréquence par segmentation en sous-intervalles de cette distribution à l'aide de polynômes de degrés variables. Le nombre et l'emplacement des sous-intervalles ont ici aussi un effet sur le degré de lissage. L'estimation au voisinage des bornes pose aussi problème. Les valeurs aberrantes ont un effet particulièrement néfaste sur une estimation spline, en particulier dans les régions pour lesquelles il y a peu d'observations.

Il existe aussi divers paramètres de lissage plus perfectionnés, souvent de nature non paramétrique, notamment l'estimation par maximum de vraisemblance local, particulièrement utile quand une connaissance préalable du comportement du jeu de données peut conduire à une bonne «première approximation» du type de courbe qu'on prendra pour modèle. Ces estimateurs sont parfois difficiles à interpréter de façon théorique.

Avec des données multidimensionnelles, le lissage devient plus complexe, compte tenu du nombre de possibilités à envisager et du nombre de paramètres de lissage qu'il faut choisir. Ainsi, plus le nombre d'éléments augmente, plus le lissage gagne progressivement en complexité. La plupart des diagrammes se résument à deux dimensions seulement, ce qui restreint l'inspection visuelle pour le choix d'un paramètre de lissage. Il est possible d'utiliser la densité des noyaux pour lisser des données multidimensionnelles, mais les problèmes que posent l'estimation aux bornes et l'utilisation d'une fenêtre fixe peuvent être encore plus délicats à résoudre que dans le cas des données unidimensionnelles.

Un espace multidimensionnel présente généralement de vastes régions vides à moins que le nombre de valeurs soit très grand. Réduire le nombre de dimensions des données, par exemple par une analyse des composantes principales, constitue une technique de lissage. Cette réduction des dimensions doit avoir pour but de préserver, dans les données de moindres dimensions, toute structure ou signal intéressant, tout en éliminant les attributs ne présentant pas d'intérêt ou les bruits.

La régression est l'un des outils de lissage les plus employés. Les modèles de régression, tant linéaires que non linéaires, sont des outils puissants pour modéliser un élément cible sous la forme d'une fonction d'un ensemble de prédicteurs, ce qui permet d'en décrire les relations et d'établir des tests concernant la robustesse de ces relations. Ces modèles peuvent cependant poser les mêmes problèmes que tout autre modèle paramétrique, à savoir que les hypothèses de départ influent sur la validité des inférences et des prévisions.

Les modèles de régression se heurtent aussi à des problèmes aux bornes des séries considérées et de lissage irréaliste de sous-intervalles sur l'étendue des données. Il est possible de résoudre ces problèmes en pondérant les sous-intervalles du domaine des données à l'aide de fenêtres variables et en ayant recours à une estimation polynomiale près des bornes. Les estimations par régression, fondées sur une estimation par la méthode des moindres carrés, subissent aussi l'influence des observations présentant des valeurs inhabituelles (valeurs aberrantes). Quand une valeur s'écarte très nettement de la majorité des autres données, la courbe lissée tend à se rapprocher, plus que ce qui paraît justifié, de la valeur aberrante. Quand on fait appel à un lissage

non paramétrique ajusté, il est souvent difficile de déterminer sans ambiguïté qu'une valeur est aberrante, puisque l'intention est de lisser toutes les observations. Une valeur aberrante peut soit correspondre à une variation naturelle sur le plan météorologique ou climatologique, soit constituer une valeur qu'il faudrait rejeter. Il est donc nécessaire d'examiner plus avant les valeurs aberrantes pour en garantir la validité. Les estimations par régression sont aussi perturbées par la corrélation. Les estimations se fondent sur l'hypothèse selon laquelle toutes les erreurs sont statistiquement indépendantes les unes des autres; une corrélation peut mettre à mal les propriétés asymptotiques des estimateurs et le comportement des fenêtres déterminées à partir des données.

5.9 ESTIMATION DE DONNÉES

Une des principales applications des statistiques à la climatologie concerne l'estimation des valeurs des éléments climatiques lorsqu'on ne dispose pas ou presque de données d'observation ou que les données attendues viennent à manquer. Dans de nombreux cas, les utilisateurs ne peuvent pas attendre, pour planifier et exécuter leurs projets, que le nombre d'observations météorologiques ou climatologiques soit suffisant. On utilise alors l'estimation pour élargir les jeux de données nécessaires. L'estimation joue aussi un rôle dans le domaine du contrôle de la qualité; on peut ainsi comparer les valeurs observées à d'autres valeurs qui l'entourent aussi bien dans le temps que dans l'espace. Les techniques d'estimation des données représentent essentiellement des applications des statistiques, mais elles doivent aussi tenir compte des propriétés physiques du système étudié. Dans tous les cas, il est indispensable que les valeurs estimées de façon statistique soient réalistes et coïncident avec la réalité physique propre aux éléments.

L'interpolation utilise les données qui se situent avant et après une valeur manquante (interpolation temporelle) ou qui entourent la valeur manquante (interpolation spatiale) pour fournir une estimation de cette valeur. Dans certains cas, l'estimation de la valeur manquante fait appel à un processus simple, par exemple le calcul de la moyenne des valeurs observées de part et d'autre de la valeur manquante. On utilise aussi des méthodes d'estimation complexes qui tiennent compte de corrélations avec d'autres éléments. Il s'agit notamment des moyennes pondérées, des fonctions splines, des régressions linéaires et du krigeage. Ces méthodes peuvent reposer uniquement sur les observations d'un élément ou prendre en compte d'autres informations, telles que la topographie ou les sorties de modèles numériques. On peut employer les fonctions splines quand les variations spatiales sont régulières. La régression linéaire permet d'utiliser toutes sortes d'informations. Le krigeage est une méthode géostatistique qui nécessite l'estimation des covariances du champ étudié. Le cokrigeage renforce le krigeage en y ajoutant l'information apportée par un deuxième élément indépendant.

L'extrapolation élargit l'étendue des données disponibles. Les valeurs extrapolées présentent des risques d'erreur plus importants, car on se sert de relations dérivées d'un ensemble de données pour les appliquer en dehors du domaine de ces données. Même si les relations empiriques mises en évidence pour un emplacement donné ou une période de temps donnée semblent justes, il faut faire preuve de prudence quand on les applique à un autre emplacement ou à une autre période de temps, car les propriétés physiques sous-jacentes risquent d'être différentes. L'extrapolation fait appel aux mêmes méthodes que l'interpolation.

5.9.1 Méthodes mathématiques d'estimation

Les méthodes mathématiques reposent uniquement sur les caractères géométriques ou polynomiaux d'un ensemble de valeurs ponctuelles pour créer une surface continue. La pondération par l'inverse de la distance et l'ajustement de courbes, notamment les fonctions splines, en sont des exemples. Ces méthodes sont des interpolateurs exacts; les valeurs observées sont conservées à l'emplacement où elles ont été mesurées.

La pondération par l'inverse de la distance se fonde sur la distance qui sépare l'emplacement pour lequel il faut interpoler une valeur et les emplacements où les observations ont été

exécutées. Par opposition à la méthode simple qui consiste à choisir l'observation de l'emplacement le plus proche, la méthode de la pondération par l'inverse de la distance combine des observations provenant de plusieurs emplacements voisins. Les observations sont pondérées en fonction de la distance qui les sépare du lieu cible; les stations les plus proches ont davantage de poids que celles qui sont plus éloignées. On applique souvent un seuil soit pour limiter la distance des emplacements dont on va utiliser les observations, soit pour limiter le nombre des observations à prendre en compte. On utilise souvent aussi la pondération par l'inverse du carré de la distance, ce qui donne davantage de poids encore aux emplacements les plus proches. Cette méthode s'affranchit de tout raisonnement physique: on part du principe que plus l'emplacement de l'observation est proche de l'emplacement cible pour lequel la donnée est estimée, meilleure est l'estimation. Il y a lieu de valider cette hypothèse avec prudence, car il se peut qu'elle ne trouve aucun fondement météorologique ou climatologique.

Les estimateurs splines présentent les mêmes inconvénients que la pondération par l'inverse de la distance. Le champ qui en résulte repose sur l'hypothèse que les processus physiques peuvent être représentés par la fonction spline, et il est rare que cette hypothèse trouve un fondement intrinsèque. Les deux méthodes sont surtout efficaces sur des surfaces lisses, si bien qu'elles peuvent ne pas proposer de représentations adéquates sur des surfaces présentant des fluctuations marquées.

5.9.2 Estimation fondée sur des relations physiques

On peut se fonder sur la cohérence qui existe du point de vue physique entre différents éléments pour établir des estimations. En cas de besoin, il est possible par exemple d'utiliser des éléments comme la durée d'insolation et la nébulosité pour estimer une valeur manquante relative au rayonnement global. On peut aussi se servir de données indirectes pour étayer une estimation. En comparant des valeurs mesurées simultanément dans deux stations proches l'une de l'autre, on s'aperçoit parfois que la différence ou le quotient de ces valeurs est à peu près constant. Cela est plus souvent vrai pour des valeurs synthétisées (données mensuelles ou annuelles) que pour des valeurs portant sur des intervalles de temps plus courts (données quotidiennes, notamment). Il est alors possible d'utiliser cette différence ou ce quotient constant pour estimer les données. Pour que ces méthodes donnent des résultats significatifs, les séries à comparer doivent être suffisamment corrélées. Le choix de la méthode est alors fonction de la structure temporelle des deux séries. On peut se servir de la différence lorsque l'élément météorologique ou climatologique présente des variations relativement semblables d'une station à l'autre. La méthode du quotient peut s'appliquer lorsque les variations temporelles des deux séries ne sont pas semblables, mais néanmoins proportionnelles (c'est en général le cas des séries dont la valeur minimale est zéro, comme pour les précipitations ou la vitesse du vent, par exemple). Quand les conditions ne sont pas remplies, il ne faut pas avoir recours à ces techniques, en particulier lorsque les variances des séries correspondant aux deux stations ne sont pas similaires. La régression, l'analyse discriminante (occurrence du phénomène) et l'analyse des composantes principales sont des outils cohérents au plan physique, mais d'une plus grande complexité.

Les méthodes déterministes se fondent sur une relation connue entre une valeur *in situ* (le prédictant) et les valeurs d'autres éléments (les prédicteurs). Cette relation se fonde souvent sur une connaissance empirique du prédictant et du prédicteur. La relation empirique peut être mise en évidence par une analyse soit physique soit statistique; il s'agit fréquemment d'une combinaison dans laquelle la relation statistique est déduite de valeurs représentant un processus physique connu. On se sert souvent de méthodes statistiques comme la régression pour établir de telles relations. La méthode déterministe étant stationnaire dans le temps et l'espace, il faut la considérer comme une méthode globale faisant apparaître les propriétés de la totalité de l'échantillon étudié. Les prédicteurs peuvent être d'autres éléments observés ou encore des paramètres géographiques tels que l'altitude, la pente ou la distance par rapport à la mer.

5.9.3 Méthodes d'estimation spatiale

L'interpolation spatiale est une procédure visant à estimer des propriétés en des lieux pour lesquels on ne dispose pas d'échantillons, mais qui se situent dans une région pour laquelle on dispose d'observations. La probabilité pour que des stations mesurent des valeurs voisines est en effet plus grande pour des stations proches que pour des stations éloignées (cohérence spatiale). Toutes les méthodes d'interpolation spatiale se fondent sur des considérations, des hypothèses et des conditions théoriques qui doivent être remplies pour qu'il soit possible d'utiliser correctement la méthode. Par conséquent, quand il s'agit de choisir un algorithme d'interpolation spatiale, il faut d'abord examiner l'objet de l'interpolation, les caractères du phénomène faisant l'objet de l'interpolation et les contraintes que présente la méthode.

Les méthodes stochastiques d'interpolation spatiale sont souvent appelées méthodes géostatistiques. Elles font en général appel à une fonction qui modélise une relation spatiale pour décrire, par rapport à la distance qui sépare les emplacements, la corrélation entre les valeurs recueillies à ces différents emplacements. L'interpolation elle-même est étroitement liée à la régression. Ces méthodes exigent que certaines hypothèses statistiques soient vérifiées, par exemple que le processus applique la loi normale, qu'il soit stationnaire dans l'espace ou qu'il soit constant dans toutes les directions.

Bien qu'elle ne soit pas foncièrement meilleure que d'autres, la technique du krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qu'on utilise souvent pour l'interpolation d'éléments tels que la température de l'air et du sol, les précipitations, les polluants atmosphériques, le rayonnement solaire et le vent. Cette technique se fonde sur l'accroissement de la variance en fonction de la distance qui sépare les points pris en considération, ce qui s'exprime sous la forme d'un variogramme. Le variogramme montre comment la différence moyenne entre les valeurs des différents points évolue en fonction de la distance et de la direction entre les points. Pour établir un variogramme, il est nécessaire de poser des hypothèses quant à la nature de la variation observée à la surface. Certaines de ces hypothèses portent sur la constance des moyennes sur l'intégralité de la surface considérée, l'existence de tendances sous-jacentes et le caractère aléatoire et indépendant des variations. Le but recherché est d'établir une relation entre toutes les variations et la distance. Il est possible de choisir un modèle de variogramme qui corresponde au processus physique étudié (par exemple sphérique, exponentiel, gaussien ou linéaire).

Parmi les inconvénients que présente le krigeage, citons la puissance de calcul que nécessitent les grands jeux de données, la complexité de l'estimation d'un variogramme et le caractère déterminant des hypothèses qu'il faut poser quand à la nature statistique de la variation. Ce dernier problème est le plus épineux. Bien que les nombreuses variantes du krigeage donnent une certaine souplesse à cette méthode, celle-ci a été mise au point initialement pour des applications dans lesquelles les distances entre les emplacements d'observation étaient faibles. Dans le cas des données climatologiques, les stations d'observation sont généralement éloignées les unes des autres, si bien que l'hypothèse de variation progressive des champs entre les points manque souvent de réalisme. En pareils cas, d'autres méthodes telles que l'interpolation assistée sur le plan climatologique (CAI) peuvent être aussi envisagées.

Étant donné que les champs météorologiques et climatologiques, notamment les précipitations, sont fortement influencés par la topographie, certaines méthodes incorporent la topographie dans l'interpolation de données climatologiques en combinant l'analyse des composantes principales, la régression linéaire multiple et le krigeage, à savoir notamment la méthode AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie) et le modèle PRISM (*Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model*) d'interpolation prenant en compte l'altitude et la pente. Selon la méthode utilisée, la topographie est décrite par l'altitude, la pente et l'orientation de la pente, en général sous forme de moyenne pour une zone donnée. Les caractéristiques topographiques sont en général de résolution spatiale plus fine que les données climatologiques.

Parmi les méthodes les plus perfectionnées reposant sur des bases physiques, il faut aussi citer celles qui s'attachent à décrire la dynamique du système climatique. En matière de prévision météorologique et de modélisation du climat, il est pratique courante d'employer ce type de modèles (voir 6.3). La puissance de calcul et la capacité de stockage qui leur sont indispensables

devenant plus facilement accessibles, ces modèles sont employés de plus en plus dans le domaine de la surveillance du climat, en particulier pour l'estimation des valeurs des éléments climatiques dans les régions isolées pour lesquelles on ne dispose pas d'observations (voir 6.2.4 sur la réanalyse).

5.9.4 Estimation de séries chronologiques

Grâce à l'estimation, il est possible de combler les données manquantes que présentent souvent des séries chronologiques; il est possible aussi de calculer des valeurs à des échelles temporelles plus fines que celles des observations. La qualité de l'estimation est meilleure quand elle ne porte que sur une ou quelques observations et non sur une longue période continue d'observations manquantes. En règle générale, plus la période à estimer est longue et plus le degré de confiance que l'on peut accorder aux estimations est faible.

Quand il s'agit d'analyser les données d'une seule station, pour remplacer une ou deux valeurs manquantes consécutives, on fait en général appel à des approximations simples par fonctions linéaires, polynomiales ou splines que l'on ajuste sur les observations effectuées juste avant et après la période à estimer. On prend donc pour hypothèse de départ que les conditions au cours de la période à estimer sont analogues à celles qui se sont produites juste avant et après celle-ci; il faut évidemment vérifier que cette hypothèse est vraie. Ce ne peut être le cas par exemple si l'opération porte sur des températures horaires et qu'un front très froid est passé au cours de la période à estimer. Pour ce qui est d'une estimation portant sur des périodes plus longues, on a recours en général à des techniques d'analyse de séries chronologiques (voir 5.5) appliquées à des parties de la série ne comportant pas de données manquantes. La modélisation sert ensuite à déterminer les périodes manquantes. Comme c'est le cas pour l'interpolation spatiale, il y a lieu de veiller à ce que les valeurs estimées par une interpolation temporelle soient plausibles. Les métadonnées ou d'autres corollaires concernant les séries chronologiques sont utiles à cet effet.

À l'échelle régionale à locale, une série d'outils, dont des générateurs stochastiques de conditions météorologiques, qui se servent des caractéristiques statistiques de séries chronologiques d'observations météorologiques pour simuler des séries chronologiques concernant les conditions météorologiques, ont été mis au point pour déterminer et évaluer les variables météorologiques dans les régions où les données sont rares.

5.9.5 Validation

Pour procéder à une estimation, on se fonde sur une structure sous-jacente ou un raisonnement physique. Il est par conséquent très important de vérifier si les hypothèses émises au cours du processus d'estimation se vérifient. Dans le cas contraire, les valeurs estimées risquent fort d'être entachées d'erreurs qui pourraient être graves et conduire à des conclusions incorrectes. L'analyse climatologique repose souvent sur des hypothèses de modélisation qui ne se vérifient pas. Prenons l'exemple d'une analyse spatiale. Pour pouvoir exécuter une interpolation entre des stations très éloignées, il faut connaître et pouvoir modéliser les régimes climatologiques entre ces stations. En réalité, de nombreux facteurs (notamment la topographie, les particularités locales ou la présence de plans d'eau) influent sur le climat d'une région. Si le modèle spatial ne prend pas en compte ces facteurs, les valeurs interpolées risquent d'être erronées. S'il s'agit d'une analyse temporelle, une interpolation visant à combler un manque de données important nécessite qu'on puisse utiliser les valeurs représentant les conditions antérieures et postérieures à la période à estimer. En réalité, plus la variabilité des régimes météorologiques auxquels est soumis l'emplacement étudié est importante, et plus il sera difficile de remplir cette condition; il se pourrait alors que les valeurs interpolées soient erronées.

La gravité d'une erreur d'interpolation est liée à l'usage qui est fait des données. Des conclusions ou des jugements fondés sur des exigences de micro-échelle (informations détaillées sur une zone relativement restreinte) sont beaucoup plus sujets à erreurs que s'ils reposaient sur des exigences de macro-échelle (informations générales sur une vaste zone). Lorsqu'on procède à une estimation, il convient donc de bien prendre en considération la sensibilité des résultats à l'usage qui est fait des données.

La validation est un élément essentiel de toute estimation. La validation par partition est une technique simple et efficace. Un échantillon relativement important du jeu de données sert à mettre au point les procédures d'estimation, et un sous-ensemble plus petit de ce jeu de données est réservé pour tester le mode d'estimation retenu. Les données de ce petit sous-ensemble sont estimées à l'aide des procédures mises au point pour le grand échantillon, et le résultat obtenu est comparé aux valeurs observées. La validation croisée est également un outil simple et efficace permettant de comparer diverses hypothèses portant soit sur les modèles (notamment le modèle de variogramme et ses paramètres, ou l'étendue du voisinage utilisé pour le krigage) soit sur les données, à l'aide uniquement de l'information comprise dans l'échantillon du jeu de données étudié. Pour procéder à une validation croisée, on retire une observation de l'échantillon de données, puis on procède à l'estimation de la valeur retirée en se basant sur le reste des observations. L'opération est répétée par le retrait d'une observation différente et ainsi de suite pour que chaque observation soit retirée successivement. Il est ensuite possible d'examiner plus avant les résidus entre les valeurs observées et les valeurs estimées, soit par une analyse statistique plus poussée, soit par une représentation graphique aux fins d'inspection visuelle. La validation croisée fournit aussi des indications quantitatives sur les performances des méthodes d'estimation. L'analyse spatiale et temporelle des résidus permet souvent d'apporter des améliorations au modèle d'estimation.

5.10 ANALYSE DES VALEURS EXTRÊMES

La pratique de la climatologie exige une bonne connaissance du comportement des valeurs extrêmes de certains éléments. Cela est vrai en particulier dans le domaine de la conception technique de structures sensibles aux conditions météorologiques ou climatologiques extrêmes (valeurs les plus élevées ou les plus basses). Les fortes précipitations par exemple, avec la hausse des débits qui en découle, mettent à mal les réseaux d'égouts, les barrages, les réservoirs et les ponts. Les vents forts augmentent la charge sur les bâtiments, les ponts, les grues, les arbres et les lignes électriques. Les toits doivent être construits pour résister à la surcharge que représentent les fortes chutes de neige. Les pouvoirs publics et les assurances peuvent être amenés à fixer des seuils au-delà desquels les dégâts occasionnés par des conditions extrêmes pourraient être pris en charge dans le cadre de plans de secours.

La période ou durée de retour, à savoir la durée moyenne de l'intervalle de temps séparant un événement de grandeur donnée d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure, est un élément qu'on utilise souvent comme critère de conception. Cette notion permet d'éviter d'adopter des coefficients de sécurité élevés et donc très coûteux, mais aussi d'éviter que les équipements et structures concernés subissent des dégâts importants causés par les phénomènes extrêmes qui risquent de se produire au cours de leur durée de vie utile. Comme il se peut que les équipements et structures en question soient conçus pour durer plusieurs années voire des siècles, l'estimation de ces périodes de retour exige de la précision en tant que facteur déterminant de la conception. Il est possible aussi de prendre pour critère de conception le nombre d'occurrences prévues d'un phénomène dont la grandeur dépasse un seuil fixé.

5.10.1 Méthode de la période de retour

Les méthodes classiques d'analyse des valeurs extrêmes représentent le comportement de l'échantillon de valeurs extrêmes par une distribution de probabilité qui corresponde du mieux possible à la distribution des valeurs observées. On associe aux distributions de valeurs extrêmes des hypothèses telles la stationnarité et l'indépendance des valeurs. Les trois distributions de valeurs extrêmes les plus connues sont les lois de Gumbel, de Fréchet et de Weibull. La loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) combine ces trois lois sous une seule formulation qui se caractérise par un paramètre de forme.

Les données qui sont modélisées par une distribution de valeurs extrêmes sont des valeurs maximales ou minimales observées au cours d'un intervalle de temps défini. Par exemple, si des températures quotidiennes sont observées pendant de nombreuses années, l'ensemble des valeurs maximales annuelles peut être représenté par une loi des valeurs extrêmes. Pour

pouvoir construire et modéliser de façon appropriée un tel ensemble de données maximales ou minimales à partir de sous-intervalles du jeu de données complet, il faut disposer d'un volume de données important, ce qui limite fortement l'emploi de la méthode quand l'échantillon de données ne couvre qu'une période restreinte. Une autre solution, aussi appelée «série de dépassement incomplète», consiste à sélectionner des valeurs supérieures à un seuil donné. La loi de Pareto généralisée est d'ordinaire utile pour un ajustement à des données dépassant un certain seuil. Il est aussi possible d'employer des techniques d'ajustement telles que la méthode de vraisemblance maximale ou la méthode des L-moments.

Une fois qu'on a trouvé la loi qui modélise l'échantillon de valeurs extrêmes, on peut calculer les périodes de retour. Une période de retour correspond à la fréquence moyenne à laquelle on s'attend à ce qu'une valeur soit égalée ou dépassée (une fois tous les 20 ans par exemple). Bien qu'il soit possible, par le calcul mathématique, d'établir des périodes de retour particulièrement longues, on ne pourra accorder que peu de confiance à de tels résultats. En règle générale, la confiance accordée à une période de retour décroît rapidement quand sa valeur dépasse environ le double de la durée du jeu de données original.

Compte tenu des graves conséquences que les phénomènes climatiques extrêmes peuvent avoir aussi bien pour les systèmes naturels que pour les activités humaines, il importe donc de savoir si les extrêmes climatiques évoluent, et de quelle manière. Certains types d'infrastructures disposent à présent de peu de marge pour résister aux incidences des changements climatiques. L'élévation du niveau de la mer menace par exemple de nombreux groupes de populations établis dans des zones côtières de faible altitude, partout dans le monde. Les stratégies d'adaptation aux extrêmes climatiques non stationnaires devraient prendre en compte les changements climatiques observés à l'échelle décennale au cours d'un passé récent, mais aussi les changements futurs prévus par les modèles climatiques. Les derniers modèles statistiques mis au point, tels les modèles généralisés non stationnaires de valeurs extrêmes, visent à lever certains des inconvénients qu'on associe aux distributions plus classiques. Au fur et à mesure que les modèles continueront d'évoluer et qu'on parviendra à mieux cerner leurs propriétés, les méthodes d'analyse des extrêmes les plus courantes seront probablement remplacées. Les lecteurs trouveront dans la publication intitulée *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WMO/TD-No. 1500) de plus amples informations sur la façon dont on peut tenir compte de l'évolution du climat dans l'évaluation des extrêmes.

5.10.2 Précipitation maximale probable

On définit la précipitation maximale probable comme étant la hauteur maximale théorique de précipitation durant une période déterminée pouvant être recueillie sur une zone de perturbation d'une superficie donnée dans des conditions géographiques particulières à une certaine époque de l'année. Ce concept est largement appliqué à la conception de barrages et d'autres ouvrages hydrauliques de grande envergure, pour lesquels un phénomène très rare peut avoir des conséquences désastreuses.

L'estimation de la précipitation maximale probable fait en général appel à des approches heuristiques comprenant les étapes suivantes:

- a) Utiliser un modèle d'orage conceptuel pour représenter les processus de précipitation par des éléments physiques, comme le point de rosée en surface, la hauteur d'une cellule orageuse, le débit entrant et le débit sortant;
- b) Étalonner le modèle à l'aide d'observations de la hauteur d'une cellule orageuse et de mesures associées de l'humidité présente dans l'atmosphère;
- c) Utiliser le modèle étalonné pour évaluer ce qui aurait pu se passer si l'humidité avait atteint son maximum dans l'atmosphère;

- d) Utiliser les caractéristiques de l'orage découlant des valeurs recueillies à des emplacements de jaugeage pour estimer la valeur correspondant à un emplacement cible, en apportant des ajustements en fonction des effets de la topographie, de la continentalité et d'autres conditions analogues non météorologiques ou non climatologiques.

5.11 MÉTHODES ROBUSTES EN STATISTIQUE

Les techniques statistiques robustes produisent des estimateurs qui restent relativement insensibles aux effets des petits écarts par rapport aux hypothèses de la modélisation. Les inférences statistiques se fondent sur des observations ainsi que sur des hypothèses sous-jacentes (caractère aléatoire, indépendance, bon ajustement du modèle). Avec des données climatologiques, bon nombre de ces hypothèses ne peuvent être vérifiées en raison de la dépendance temporelle et spatiale des observations, du manque d'homogénéité des données, des erreurs qui entachent les données et d'autres facteurs.

Il convient d'évaluer la validité des conclusions pour déterminer, quantitativement si possible et au moins de manière qualitative, l'effet des hypothèses sur les résultats des analyses. Il importe aussi de bien tenir compte de l'objet de l'analyse. Des conclusions générales se fondant sur des processus à grande échelle temporelle ou spatiale comprenant de nombreux calculs de moyennes à partir d'un jeu de données important sont souvent moins sensibles aux écarts par rapport aux hypothèses que des conclusions qui seraient plus spécifiques. Les techniques statistiques robustes sont souvent appliquées à la régression.

Si les résultats sont sensibles à une infirmation des hypothèses, l'analyste devrait signaler ce fait quand il diffuse les résultats aux utilisateurs. On peut aussi avoir recours à d'autres méthodes d'analyse qui ne sont pas sensibles au non-respect des hypothèses ou qui ne posent pas d'hypothèses au sujet des facteurs auxquels les résultats sont sensibles. Étant donné que les méthodes paramétriques imposent davantage de conditions que les méthodes non paramétriques, il peut se révéler possible de réanalyser les données à l'aide de techniques non paramétriques. On utiliserait par exemple la médiane ou l'écart interquartile au lieu de la moyenne ou de l'écart type afin de diminuer la sensibilité aux valeurs aberrantes ou aux erreurs grossières que comportent les données d'observation.

5.12 PROGICIELS DE STATISTIQUE

Comme le traitement et l'analyse climatologiques reposent en grande partie sur des méthodes statistiques universelles, les progiciels de statistique sont des outils informatiques présentant un intérêt pour les climatologues. Il existe plusieurs logiciels d'analyse statistique générale pour différentes plates-formes informatiques.

Les progiciels de statistique se composent de nombreux utilitaires pour la gestion des données, leur analyse et la création de rapports. Le progiciel choisi devra posséder tous les outils nécessaires à la gestion, au traitement et à l'analyse des données, sans être surchargé d'outils inutiles, sources d'inefficacité. On trouve souvent une partie des utilitaires élémentaires dans un système de gestion des données climatologiques (voir chapitre 3).

Les outils de base pour la gestion des données permettent d'effectuer toute une série d'opérations destinées à préparer les données aux fins de traitement et d'analyse. Il s'agit notamment du tri, de l'ajout de données, de la séparation des données en sous-ensembles, de la transposition de matrices, de calculs arithmétiques et de la fusion des données. Les outils de base pour le traitement statistique comprennent les opérations de statistique descriptive d'échantillons, le calcul des corrélations, la création de tables de fréquence, les tests d'hypothèses. Les outils d'analyse couvrent en général une grande partie des besoins de l'analyse climatologique, notamment l'analyse de variance, l'analyse de régression, l'analyse discriminante, l'analyse de groupes, l'analyse multidimensionnelle et l'analyse des séries

chronologiques. Les résultats découlant des analyses sont habituellement regroupés en jeux de données résultants et peuvent être sauvegardés, exportés ou transformés et par conséquent être soumis à d'autres opérations plus poussées d'analyse et de traitement.

Les progiciels de statistique comportent des outils graphiques permettant de créer des diagrammes en deux et trois dimensions, de les modifier et de les sauvegarder dans les formats propres aux progiciels eux-mêmes ou dans d'autres formats graphiques standard. La plupart des progiciels permettent de créer des diagrammes de dispersion (à deux ou trois dimensions); des diagrammes à bulles; des tracés linéaires, des histogrammes, des courbes interpolées (lissées); des diagrammes en barres verticales, des diagrammes en barres horizontales et des graphiques en secteurs ou camemberts; des diagrammes en boîte ou boîte à moustache; et des graphiques spatiaux tridimensionnels, y compris des isogrammes. Certains progiciels proposent aussi des utilitaires permettant d'afficher les valeurs de certains éléments sur des cartes, sans pour autant remplacer un système d'information géographique (SIG). Un SIG intègre le matériel, le logiciel et les données pour capturer, gérer, analyser et afficher toutes formes d'informations référencées géographiquement. Certains programmes de SIG offrent des possibilités d'interpolation géographique, notamment des outils de cokrigage et de régression géographiquement pondérée.

Les outils d'analyse interactive combinent la puissance de l'analyse statistique et la capacité de contrôler visuellement les conditions d'une analyse statistique en particulier. Ils permettent de sélectionner visuellement les valeurs à inclure dans une analyse ou à exclure d'une analyse et offrent la possibilité de refaire les calculs en fonction de cette nouvelle sélection. Une telle souplesse se révèle utile dans les calculs de tendances, quand les séries de données climatologiques contiennent des valeurs aberrantes et d'autres points douteux. Il est possible d'exclure ces points de l'analyse de façon interactive à partir d'une représentation graphique de la série, puis de recalculer automatiquement les tendances. Souvent, ces outils permettent aussi d'analyser et de représenter graphiquement des sous-groupes de données.

5.13 FOUILLE DE DONNÉES

La fouille de données, également appelée exploration de données, forage de données ou prospection de données, est un processus analytique qui consiste à rechercher, dans de gros volumes de données (mégadonnées), des schémas de répartition cohérents ou des relations systématiques entre éléments, puis de valider les résultats en appliquant les schémas décelés à de nouveaux sous-ensembles de données. On estime qu'elle relève à la fois de la statistique, de l'intelligence artificielle et de la recherche d'informations dans les bases de données. C'est un champ d'application qui progresse rapidement du point de vue tant théorique que pratique. L'intérêt de la fouille de données, c'est qu'elle s'applique aux problèmes climatologiques lorsque le volume des données est important et que le moyen de trouver des relations significatives parmi les éléments climatiques ne paraît pas évident, en particulier en début d'analyse.

Comme l'analyse exploratoire de données, la fouille de données vise aussi à rechercher d'éventuelles relations parmi les éléments dans des situations où celles-ci n'apparaissent pas clairement. Cela étant, elle n'a pas pour objet de déterminer spécifiquement les relations qui lient des éléments étudiés. Elle est davantage axée sur le fait de produire une solution qui puisse engendrer des prévisions utiles. En matière d'exploration de données ou de découverte de connaissances, elle fonctionne sur le principe de la «boîte noire» et fait appel non seulement aux techniques classiques d'analyse exploratoire des données, mais aussi à des techniques comme les réseaux neuronaux, qui peuvent produire des prévisions valables sans pour autant mettre le doigt sur la nature précise des relations qui lient les éléments, sur lesquelles les prévisions se fondent.

BIBLIOGRAPHIE

- Organisation météorologique mondiale, 1966: *Quelques méthodes de l'analyse climatologique* (OMM/NT-N° 81, OMM-N° 199). Genève.
- , 1990: *Sur l'analyse statistique des séries d'observations* (OMM/NT-N° 143, OMM-N° 415). Genève.
- , 1994: *Guide des applications de la climatologie maritime* (OMM-N° 781). Genève.
- , 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WCDMP-No. 53, WMO/TD-No. 1186). Genève.
- , 2009: *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WCDMP-No. 72, WMO/TD-No. 1500). Genève.

AUTRES LECTURES

- Acharya, N., A. Frei, J. Chen, L. De Cristofaro et E.M. Owens, 2017: Evaluating Stochastic Precipitation Generators for Climate Change Impact Studies of New York City's Primary Water Supply. *Journal of Hydrometeorology*, 18 (3):879-896, doi:10.1175/JHM-D-16-0169.1.
- Ailliot, P., D. Allard, V. Monbet et P. Naveau, 2015: Stochastic weather generators: an overview of weather type models. *Journal de la Société Française de Statistique*, 156 (1):101–113.
- Alexandersson, H., 1986: A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology*, 6:661–675.
- Angel, J.R., W.R. Easterling et S.W. Kirtsch, 1993: Towards defining appropriate averaging periods for climate normals. *Climatological Bulletin*, 27:29–44.
- Beljaars, A.C.M., L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B.J. Hoskins, L. Isaksen, P.A.E.M. Janssen, R. Jenne, A.P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N.A. Rayner, R.W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K.E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo et J. Woollen, 2005: The ERA-40 reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131:2961–3012.
- Bénichou, P. et O. Le Breton, 1987: Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 7(19):23–34.
- Burrough, P.A., 1986: *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12. Oxford, Oxford University Press.
- Cook, E.R., K.R. Briffa et P.D. Jones, 1994: Spatial regression methods in dendroclimatology: A review and comparison of two techniques. *International Journal of Climatology*, 14:379–402.
- Daley, R., 1993: *Atmospheric Data Analysis*. New York, Cambridge University Press.
- Dalgaard, P., 2002: *Introductory Statistics with R*. New York, Springer.
- Daly, C., R.P. Neilson et D.L. Phillips, 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33:140–158.
- Della-Marta, P.M. et H. Wanner, 2006: Method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements. *Journal of Climate*, 19:4179–4197.
- Deutsch, C.V. et A.G. Journel, 1998: *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Deuxième édition. Oxford, Oxford University Press.
- Dixon, K.W. et M.D. Shulman, 1984: A statistical evaluation of the predictive abilities of climatic averages. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:1542–1552.
- Domonkos, P. et J. Coll, 2017: Homogenisation of temperature and precipitation time series with ACMANT3: method description and efficiency tests. *International Journal of Climatology*, 37(4):1910–1921.
- Donat, M.G., L.V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, R.J.H. Dunn, K.M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A.M.G. Klein Tank, A.C. Kruger, J. Marengo, T.C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A.S. Elrayah, S.S. Sekele, A.K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroel, L.A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang, S. Kitching, 2013: Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118:2098–2118, doi:10.1002/jgrd.50150.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2008: *ArcGIS Geographical Information System*. Redlands.
- Fisher, R.A. et L.H.C. Tippet, 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24:180–190.

- Frich, P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank et T. Peterson, 2002: Global changes in climatic extreme events during the second half of the 20th century. *Climate Research*, 19:193–212.
- Gabor, D, 1946: Theory of communication. *J. IEEE*, 93:429–457.
- Gandin, L., 1963: Objective Analysis of Meteorological Fields. Leningrad, Hydrometeoizdat, en russe (Traduction anglaise: Israel Program for Scientific Translation, Jérusalem, 1965).
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 1997: *Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC: Document technique II du GIEC* (publié sous la direction de J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs et K. Maskell). Genève.
- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones et M. New, 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113: D20119, DOI:10.1029/2008JD010201.
- Heino, R., 1994: *Climate in Finland During the Period of Meteorological Observations*. Contributions, No. 12. Helsinki, Institut météorologique finlandais.
- International ad hoc Detection and Attribution Group (IDAG), 2005: Detecting and attributing external influences on the climate system: A review of recent advances. *Journal of Climate*, 18:1291–1314.
- Jenkinson, A.F., 1955: The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81:158–171.
- Jones, P.D., S.C.B. Raper, B. Santer, B.S.G. Cherry, C. Goodess, P.M. Kelly, T.M.L. Wigley, R.S. Bradley et H.F. Diaz, 1985: *A Grid Point Surface Air Temperature Data Set for the Northern Hemisphere*, DOE/EV/10098-2. Washington, DC, United States Department of Energy.
- Jones, P.D., E.B. Horton, C.K. Folland, M. Hulme et D.E. Parker, 1999: The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Climatic Change*, 42:131–149.
- Jureckova, J. et J. Picek, 2006: *Robust Statistical Methods with R*. Boca Raton, Chapman and Hall/CRC.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deavan, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woolen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne et D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:437–471.
- Kaplan, A., Y. Kushnir, M. Cane et M. Blumenthal, 1997: Reduced space optimal analysis for historical datasets: 136 years of Atlantic sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 102:27835–27860.
- Karl, T.R., C.N. Williams Jr et P.J. Young, 1986: A model to estimate the time of observation bias associated with monthly mean maximum, minimum, and mean temperatures for the United States. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25:145–160.
- Kharin, V.V. et F.W. Zwiers, 2005: Estimating extremes in transient climate change simulations. *Journal of Climate*, 18:1156–1173.
- Kohler, M.A., 1949: Double-mass analysis for testing the consistency of records for making adjustments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 30:188–189.
- Mann, M. E., 2004: On smoothing potentially non-stationary climate time series. *Geophysical Research Letters*, 31: L07214, DOI:10.1029/2004GL019569.
- Mehan, S., T. Guo, M.W. Gitau et D.C. Flanagan, 2017: Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation. *Climate*, 5 (2), article N° 26, doi:10.3390/cli5020026.
- National Climatic Data Center (NCDC), 2006: *Second Workshop on Climate Data Homogenization*, National Climatic Data Center (Asheville, Caroline du Nord, 28–30 mars 2006). Atelier organisé conjointement par la Direction de la recherche climatologique d'Environnement Canada et le NCDC de la NOAA.
- Palus, M. et D. Novotna, 2006: Quasi-biennial oscillations extracted from the monthly NAO index and temperature records are phase-synchronized. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 13:287–296.
- Peterson, T.C., D.R. Easterling, T.R. Karl, P. Groisman, N. Nicholls, N. Plummer, S. Torok, I. Auer, R. Boehm, D. Gullett, L. Vincent, R. Heino, H. Tuomenvirta, O. Mestre, T. Szentimrey, J. Salinger, E.J. Forland, I. Hanssen-Bauer, H. Alexandersson, P. Jones et D. Parker, 1998: Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *International Journal of Climatology*, 18:1493–1517.
- Peterson, T.C., C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit et N. Plummer, 2001: *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001*. International CLIVAR Project Office (ICPO) Publication Series, 48. Southampton, Royaume-Uni.
- Peterson, T. C. et al., 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean Region. *Journal of Geophysical Research*, 107(D21):4601.

- Philipp, A., P.M. Della-Marta, J. Jacobbeit, D.R. Fereday, P.D. Jones, A. Moberg et H. Wanner, 2007: Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate*, 20:4065–4095.
- Ribeiro, S., J. Caineta et A. Costa, 2016: Review and discussion of homogenisation methods for climate data. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94: 167–179.
- Ribeiro, S., J. Caineta, A.C. Costa et R. Henriques, 2017: GSIMCLI: A geostatistical procedure for the homogenisation of climatic time series. *International Journal of Climatology*, 37 (8):3452–3467.
- Schnase, J.L., T.J. Lee, C.A. Mattmann, C.S. Lynnes, L. Cinquini, P.M. Ramirez, A.F. Hart, D.N. Williams, D. Waliser, P. Rinsland, W.P. Webster, D.Q. Duffy, M.A. Mcinerney, G.S. Tamkin, G.L. Potter et L. Carrier, 2016: Big data challenges in climate science: Improving the next-generation cyberinfrastructure. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4 (3):10–22, doi:10.1109/MGRS.2015.2514192.
- Sen, P.K., 1968: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63:1379–1389.
- Sensoy, S., T.C. Peterson, L.V. Alexander et X. Zhang, 2007: Enhancing Middle East climate change monitoring and indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88:1249–1254.
- Shabbar, A. et A.G. Barnston, 1996: Skill of seasonal climate forecasts in Canada using canonical correlation analysis. *Monthly Weather Review*, 124(10):2370–2385.
- Torrence, C. et G.P. Compo, 1998: A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:61–78.
- Ulbrich, U. et M. Christoph, 1999: A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics*, 15:551–559.
- Uppala, S.M. P.W. Källberg, A.J. Simmons, U. Andrae, V. da Costa Bechtold, M. Fiorino, J.K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G.A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R.P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M.A. Balmaseda, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Holm, B.J. Hoskins, L. Isaksen, P.A.E.M. Janssen, R. Jenne, A.P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N.A. Rayner, R.W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K.E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo et J. Woollen, 2005: The ERA-40 reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131:2961–3012.
- von Storch, H. et F.W. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Wackernagel, H., 1998: Kriging, cokriging and external drift. In: *Workshop on Dealing with Spatialisation* (publié sous la direction de B. Gozzini et M. Hims). Toulouse, Action COST 79, Union européenne.
- Wahba, G. et J. Wendelberger, 1980: Some new mathematical methods for variational objective analysis using splines and cross-validation. *Monthly Weather Review*, 108:36–57.
- Wang, X.L. et V. R. Swail, 2001: Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *Journal of Climate*, 14:2204–2221.
- Wang, X.L., 2008: Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47:2423–2444.
- Wilks, D.S., 2002: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Deuxième édition. New York, Academic Press.
- Willmott, C.J. et S. Robeson, 1995: Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air-temperature. *International Journal of Climatology*, 15 (2):221–229.
- Yozgatligil, C. et C. Yazici, 2016: Comparison of homogeneity tests for temperature using a simulation study. *International Journal of Climatology*, 36 (1):62–81, doi:10.1002/joc.4329.
- Yue, S., P. Pilon et G. Cavadias, 2002: Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259:254–271.
- Zhang, X., E. Aguilar, S. Sensoy, H. Melkonyan, U. Tagiyeva, N. Ahmed, N. Kutaladze, F. Rahimzadeh, A. Taghipour, T.H. Hantosh, P. Albert, M. Semawi, M. Karam Ali, M. Halal Said Al-Shabibi, Z. Al-Oulan, Taha Zatari, I. Al Dean Khelet, S. Hammoud, M. Demircan, M. Eken, M. Adiguzel, L. Alexander, T. Peterson et Trevor Wallis, 2005: Trends in Middle East climate extremes indices during 1930–2003. *Journal of Geophysical Research*, 110: D22104, DOI:10.1029/2005JD006181.

CHAPITRE 6. PRODUITS CLIMATOLOGIQUES ET DIFFUSION DE CES PRODUITS

6.1 DIRECTIVES GÉNÉRALES

Les produits climatologiques regroupent des informations sous forme de données, de résumés, de tableaux, de graphiques, de cartes, de rapports et d'analyses. Ils peuvent présenter des distributions spatiales sous forme de cartes. Les produits plus complexes, comme les atlas ou les analyses climatologiques, peuvent combiner différents types de représentations graphiques accompagnées de textes descriptifs. Il peut s'agir aussi de bases de données associées à des outils logiciels permettant à des clients en ligne de produire des données statistiques et des graphiques en fonction de leurs propres besoins.

Les produits et les données sur lesquelles ils reposent doivent être de la meilleure qualité possible compte tenu des contraintes de temps relatives à la fourniture de l'information. On constate une demande de plus en plus grande en faveur de produits climatologiques diffusés le plus rapidement possible après la période au cours de laquelle les données sont rassemblées. Veiller à la qualité de ces produits est devenu un sujet de préoccupation. Le temps qui s'écoule entre le moment où les observations sont réalisées et celui où le produit est livré à l'utilisateur est tellement court qu'il ne suffit pas à l'exécution du processus complet du contrôle de la qualité, si bien que seule la partie automatisée du contrôle est appliquée. Il faudrait au moins pouvoir procéder à des vérifications de base à la réception des données (voir le chapitre 3). Il faut alerter les utilisateurs sur les risques qu'il convient d'associer à ce type de produits et, comme il s'agit habituellement de produits diffusés automatiquement, un message d'alerte à cet effet devrait être inscrit sur le produit. Un système d'assurance de la qualité efficace permet de traiter aussi ce type d'information.

Les produits portant sur des données historiques devraient être de meilleure qualité que ceux élaborés à partir de données très récentes. Toutes les données qui entrent dans l'élaboration des relevés climatologiques doivent faire l'objet de vérifications portant sur les erreurs aléatoires et systématiques, l'homogénéité, la représentativité spatiale et les parties manquantes des séries chronologiques. Pour des produits tels que les atlas climatiques ou les règlements techniques, les données utilisées devraient être celles des périodes de référence standard (voir 4.8). Il faut éviter les révisions fréquentes basées sur de nouvelles périodes de relevés. Quand une partie du contenu d'un produit ne présente pas une stabilité satisfaisante sur une longue période, il faut lui adjoindre un complément d'information précisant la nature de la variabilité ou de l'évolution.

Il est généralement très utile d'accompagner les tableaux de données climatologiques historiques et statistiques d'un texte explicatif qui aide l'utilisateur à interpréter les données et fait ressortir les éléments climatiques les plus importants. Toutes les publications climatologiques doivent donner suffisamment d'information et de données sur l'emplacement et l'altitude des stations d'observation, l'homogénéité des données issues de toutes les stations, les périodes de relevé utilisées et les méthodes statistiques et d'analyse employées.

Il convient de vérifier avec soin tous les éléments graphiques des produits avant de mettre ceux-ci à la disposition des utilisateurs éventuels. Il convient par exemple de veiller à bien concevoir les cartes climatologiques en choisissant avec soin les couleurs et les échelles, en y adjoignant des titres explicites et en y indiquant l'objet de l'analyse, la période des relevés ainsi que les organisations d'où émanent les données. Pour qu'elles soient faciles à comparer, les cartes doivent présenter une certaine cohérence en ce qui concerne le choix des couleurs, de la présentation et des données.

Il y a lieu d'œuvrer en consultation avec chacun des bénéficiaires de services d'information sur l'environnement. Il convient de prendre en considération les avis des parties intéressées lorsqu'on crée, modifie ou supprime des produits ou services.

6.1.1 Périodiques de données climatologiques

Une publication climatologique est dite périodique quand elle paraît régulièrement à des intervalles de temps précis. La plupart des périodiques de données climatologiques sont publiés sur une base mensuelle ou annuelle. Cependant, certains services publient également des périodiques à des intervalles différents, hebdomadaires ou saisonniers. Les publications hebdomadaires ou mensuelles paraissent à la fin de la période en question et contiennent habituellement des données récentes qui n'ont pas été soumises à un contrôle de la qualité complet. Ces périodiques contiennent des données à jour qui peuvent être d'une grande utilité pour différents secteurs économiques, sociaux et environnementaux, même si elles comportent certaines erreurs ou omissions. Les publications trimestrielles ou saisonnières servent souvent à diffuser des résumés de données saisonnières comme les chutes de neige hivernales, les précipitations pendant la période de végétation, les degrés-jours de réfrigération en été ou les degrés-jours de chauffage en hiver.

La plupart des SMHN publient des bulletins mensuels contenant des données qui proviennent de stations choisies dans des régions, provinces ou États en particulier, ou encore pour le pays dans son ensemble. Publié une semaine ou deux après la fin de chaque mois, ces bulletins proposent habituellement des données récentes qui n'ont peut-être pas fait l'objet d'un contrôle de la qualité complet. Lorsqu'ils sont publiés un mois ou plus après la fin du mois d'observation, ils devraient cependant contenir des données répondant toutes aux critères normalisés de contrôle de la qualité spécifiques aux données climatologiques historiques. Les températures maximales et minimales et les hauteurs totales de précipitation pour chaque jour y sont présentées, ainsi peut-être que les températures relevées aux heures fixes avec les valeurs associées de l'humidité. La vitesse quotidienne moyenne du vent et sa direction dominante, la durée de l'insolation et d'autres données présentant localement une importance (notamment le nombre de degrés-jours de chauffage, de réfrigération et de croissance) peuvent également y être incluses. Les moyennes, les extrêmes et d'autres données statistiques provenant de toutes les stations devraient aussi y figurer si des données de ce type sont disponibles.

La plupart des bulletins mensuels ne contiennent que des données climatologiques en surface, mais certains SMHN y incluent également des données de base provenant de stations d'observation en altitude ou publient séparément des bulletins mensuels contenant ce genre de données. Dans ces bulletins mensuels figurent habituellement, pour les surfaces isobares standard, les valeurs quotidiennes et mensuelles moyennes de données qui portent en général sur l'altitude (en mètres géopotentiels), la température, l'humidité et la vitesse et la direction du vent, relevées au cours d'un ou deux radiosondages quotidiens à heure fixe.

Parmi les publications climatologiques les plus utiles, on compte celles qui contiennent des tableaux simples des valeurs mensuelles et annuelles de la température quotidienne moyenne et de la hauteur totale de précipitation. Ces tableaux sont préparés par les SMHN et publiés soit sur papier soit sous forme électronique. Les SMHN doivent aussi publier, au moins une fois par décennie, un ensemble complet de données climatologiques statistiques pour un groupe de stations sélectionnées en fonction de leur représentativité.

Les périodiques publiés par l'OMM sont constitués à partir de données fournies par les Membres. On peut citer, par exemple, la publication intitulée *Monthly Climatic Data for the World* (données issues de toutes les stations CLIMAT), les *World Weather Records* (pour chaque station, les valeurs historiques, mensuelles et annuelles de la pression à la station, de la pression au niveau de la mer, de la température et des précipitations) et les *Marine Climatological Summaries* (données statistiques et cartes climatologiques mensuelles, annuelles et décennales pour les océans).

Depuis 1993, l'OMM, par l'intermédiaire de sa Commission de climatologie et en collaboration avec ses Membres, a aussi publié des déclarations annuelles sur l'état du climat mondial afin de fournir des informations scientifiques fiables sur le climat et sa variabilité.

Par ailleurs, la publication intitulée *Climate Diagnostics Bulletin*, publiée par le Centre de prévision du climat de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA), est une publication mensuelle d'une grande utilité, en particulier pour ce qui concerne l'analyse du phénomène El Niño-oscillation australe (ENSO) et d'autres téléconnexions climatiques.

6.1.2 Publications occasionnelles

À la différence des périodiques de données climatologiques, qui sont produits suivant un calendrier établi, les publications occasionnelles paraissent lorsque le besoin s'en fait sentir. Elles se présentent sous une forme destinée à satisfaire les besoins d'un grand nombre d'utilisateurs pendant une durée relativement longue de sorte qu'elles ne nécessitent pas de mises à jour fréquentes. Ces publications sont destinées à certains utilisateurs qui ont besoin d'informations pour planifier des investissements, concevoir des équipements et des bâtiments qui doivent durer des décennies ou des siècles, ainsi qu'aux particuliers dont l'intérêt est purement intellectuel ou occasionnel ou encore aux chercheurs dans le domaine des sciences de l'atmosphère et de l'océan. Elles peuvent aussi être conçues pour résumer ou expliquer des phénomènes peu courants, notamment des conditions météorologiques extrêmes, et fournir une description ou assurer un suivi s'agissant d'un phénomène prévu, un épisode El Niño intense par exemple. Le contenu et la présentation d'une publication occasionnelle doivent tenir compte de l'intérêt et des besoins des utilisateurs auxquels elle s'adresse.

De longues séries ininterrompues et homogènes de données présentent un grand intérêt pour les études climatologiques comparées et pour la recherche sur les fluctuations, les tendances et les changements climatiques. Plusieurs SMHN ont publié de telles séries pour un certain nombre de stations où les conditions d'exposition et les méthodes d'observation sont restées essentiellement constantes. Les séries de données les plus couramment disponibles et demandées sont celles qui portent sur la température et sur les précipitations, bien que les données sur le vent, la pression, l'insolation, la nébulosité et d'autres éléments climatiques puissent également être publiées. Certains SMHN font figurer dans leurs annuaires ou d'autres bulletins annuels des séries de données climatologiques historiques. Il convient aussi de publier et de mettre à jour périodiquement des monographies consacrées au climat d'un pays ou d'une région qui présentent un intérêt pour un large éventail d'utilisateurs. Il est recommandé de mettre aussi à disposition ces publications et données sous une forme électronique, ce qui en facilite l'accès et l'échange.

Des séries de cartes présentées sous forme d'atlas constituent également une publication occasionnelle utile. Les légendes des cartes climatologiques doivent fournir des indications précises sur les éléments cartographiés et indiquer le nombre des stations d'où proviennent les données en précisant la période des relevés.

6.1.3 Produits types

Par rapport à des produits spécialement destinés à des utilisateurs bien précis et qui représentent la meilleure solution pour ces utilisateurs, il est généralement avantageux de mettre au point un produit type dont peuvent se servir un large éventail d'utilisateurs. Par exemple, un produit présentant des degrés-jours sera utile dans le domaine de la gestion de l'énergie comme dans celui de la production de fruits. En choisissant avec soin le contenu et la forme de présentation d'un produit, il est possible de répartir le coût d'élaboration entre de nombreux utilisateurs. Les produits types viennent s'intercaler entre les périodiques de données climatologiques et les produits personnalisés. Pour bien répondre aux besoins des différents groupes d'utilisateurs, on gagne à procéder localement à l'élaboration de ces produits.

La demande et la diffusion des produits s'effectuent de plus en plus par l'intermédiaire de l'Internet, de sorte que l'interface utilisateur pour ces systèmes peut être considérée comme un autre produit des Services climatologiques, une normalisation de cette interface étant alors perçue comme une amélioration de la qualité et de l'utilité du produit.

6.1.4 **Produits spécialisés**

Il est souvent nécessaire de mettre au point des produits destinés à un utilisateur ou à un secteur en particulier. Étant donné que les exigences particulières d'un groupe d'utilisateurs ne correspondent pas toujours aux exigences des autres groupes, le coût d'une diffusion visant à une mise à disposition générale ne peut se justifier pour ce type de produit.

De tels produits de climatologie appliquée sont donc adaptés aux besoins d'un utilisateur ou d'un groupe d'utilisateurs en particulier. Ils constituent un trait d'union entre les données observées et les exigences spécifiques d'un utilisateur. Les observations sont ainsi transformées en un produit à valeur ajoutée pour ses destinataires. Pour élaborer ce type de produit, il faut analyser les données et présenter l'information en se concentrant sur les caractéristiques qui permettront à l'utilisateur de tirer un avantage optimal de l'information transmise. C'est en général l'usage auquel le produit est destiné qui conditionne les processus d'analyse et de transformation des données qu'il faut exécuter ainsi que le mode de diffusion du produit.

Un Service climatologique doit pouvoir accepter les demandes de produits spécialisés et élaborer ce type de produits de façon à satisfaire les utilisateurs, ce qui doit mobiliser toutes ses compétences en matière d'interaction avec les utilisateurs et de commercialisation, dont il a déjà été question. Bien que les produits spécialisés ne soient pas destinés au grand public, les utilisateurs s'attendent à ce que la qualité du contenu et de la présentation soit au moins comparable à celle des autres produits.

Prenons pour exemple d'application particulière à laquelle serait destiné un produit celle que représente le besoin d'un producteur de fruits en données quotidiennes exprimées en degrés-heures pour pouvoir traiter par pesticides un feu bactérien. Quand on ne dispose pour l'emplacement visé que des températures minimales et maximales quotidiennes, il est possible de calculer les degrés-jours en établissant la moyenne de ces deux valeurs. Mais comme en l'occurrence on a besoin de degrés-heures, il faut, par une analyse, établir une relation entre les degrés-jours ainsi calculés et les degrés-heures. Il faut aussi évaluer dans quelles conditions cette relation se vérifie et quel est son degré d'incertitude. Une fois la relation établie, il est possible de proposer à l'utilisateur un produit contenant des degrés-heures, alors que ces valeurs ne sont pas directement issues d'une mesure.

Une analyse des crues est aussi un exemple de produit spécialisé. Les inondations sont un phénomène naturel dont l'ampleur varie, allant d'un ruissellement pluvial le long du flanc saturé d'une colline au débordement de grands cours d'eau. Les conséquences des crues sont multiples, des champs gorgés d'eau et des routes bloquées à l'inondation d'habitations et d'immeubles à usage commercial, voire parfois à des pertes en vies humaines. Les estimations de la fréquence des crues sont nécessaires à la planification et à l'évaluation des défenses contre les crues; à la conception d'ouvrages comme les ponts, les caniveaux ou les déversoirs de réservoirs; et à la préparation des cartes de risques d'inondations servant à la planification de nouveaux aménagements ou pour les besoins des assurances. Pour établir des estimations de la fréquence des crues, il faut disposer notamment de produits sur la probabilité des hauteurs de précipitation. Pour produire des renseignements sur les risques de précipitations, soit une information à valeur ajoutée, il faudra procéder à l'analyse statistique des données découlant des observations qui se présentent généralement sous la forme de résumés standard (voir le chapitre 5). Si les analyses de risques se révèlent utiles à plusieurs utilisateurs différents, il sera justifié d'en diffuser les résultats sous la forme d'une publication générale.

6.1.5 **Produits de la surveillance du climat**

La surveillance de la variabilité du climat dans le monde fait partie des objectifs du Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat (PMDSC). Le travail d'exploitation et de mise à disposition des données et informations sur le climat réalisé par un Service climatologique contribue à l'atteinte de cet objectif. Pour surveiller le climat d'un pays et établir un diagnostic à ce sujet, il est nécessaire de considérer les conditions climatiques que connaît le pays comme un élément du système climatique planétaire. Outre le fait de surveiller

les climats locaux aux fins d'intérêts nationaux et d'établir des relations entre les épisodes actuels et les régimes historiques, un Service climatologique doit placer les variations d'échelle locale dans un contexte plus large, régional, voire mondial.

Dans un même pays, l'observation et la surveillance du climat peuvent relever de plusieurs organismes. Quand un organisme publie des données d'observation, des résultats d'analyse et des données statistiques, les produits qu'il crée sont habituellement présentés sous une forme destinée à répondre à ses propres besoins. Ces produits risquent donc de ne pas convenir à d'autres organismes. Par ailleurs, il peut ne pas être facile pour un utilisateur en particulier de choisir des produits qui répondent à ses propres besoins parmi les produits de surveillance du climat distribués par divers organismes ou de réunir un ensemble disparate de produits pour tenter d'y voir clair dans le système climatique global. Pour beaucoup d'utilisateurs, il est difficile aussi de percevoir le lien entre les caractéristiques du système climatique planétaire et les conditions climatiques que connaît leur propre pays. Un Service climatologique devrait donc traiter ses propres données et les résultats des analyses qu'il exécute et, dans la mesure du possible, les assembler avec les produits d'autres organismes pour diffuser rapidement un ensemble de documents comprenant l'avis de différents organismes quant aux conditions climatiques actuelles.

Lorsqu'il ne dispose pas des données dont il a besoin, un SMHN devrait obtenir des données et analyses régionales ou mondiales auprès d'organismes étrangers ou internationaux, pour ensuite traiter l'information afin de la présenter sous une forme adaptée à un usage local ou national. Il devrait cependant adjoindre, à ces analyses d'échelle mondiale, son propre avis sur les liens éventuels entre les conditions climatiques locales et les champs climatiques à grande échelle. Les activités de surveillance exigent d'un Service climatologique qu'il se soit doté de l'expertise indispensable pour analyser l'état du climat passé et actuel ainsi que les téléconnexions mondiales et régionales et être ainsi en mesure de présenter aux utilisateurs du secteur public et du secteur privé une information synthétique. Pour pouvoir établir des bulletins de prévision et de suivi des conditions climatiques, il faut avant tout disposer de produits de surveillance de qualité.

6.1.6 Indices

On a souvent recours à des indices pour présenter aux utilisateurs des régimes climatiques historiques sous une forme simple et explicite (voir 4.4.6). Les indices climatiques sont largement utilisés pour faire apparaître les caractéristiques du climat dans les prévisions et déceler les changements climatiques. Ils peuvent s'appliquer à une station climatologique en particulier ou décrire certains aspects du climat propre à une zone. Ils combinent généralement plusieurs éléments pour décrire les caractéristiques de différents paramètres: sécheresse, continentalité, phases phénologiques de la végétation, degrés-jours de chauffage, régimes de la circulation à grande échelle, téléconnexions, etc. Avec les informations qu'il fournit aux utilisateurs, un Service climatologique devra souvent fournir une interprétation de la signification de la valeur d'un indice, de l'évolution des valeurs de cet indice en fonction du temps et parfois des procédures de calcul de l'indice. Voici quelques exemples d'indices: l'indice ENSO; l'indice de l'oscillation de l'Atlantique Nord; des descripteurs tels que l'indice d'humidité disponible, qu'on utilise pour établir des stratégies de planification des cultures; les indices agrométéorologiques, notamment l'indice de sécheresse de Palmer, l'indice d'aridité et l'indice de surface foliaire, qui servent à décrire et à surveiller le degré d'humidité disponible; ou encore l'indice moyen de mousson, qui fournit une répartition spatiale sommaire des sécheresses et des inondations. Comme on peut s'en apercevoir à la lecture de la publication intitulée *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WMO/TD-No. 1500, WCDMP-No. 72), la création d'indices portant spécifiquement sur la détection des changements climatiques, de la variabilité du climat et des extrêmes climatiques, ainsi que l'évaluation de ces indices, ne cessent de progresser.

6.2 DONNÉES AUX POINTS DE GRILLE

Les produits de données climatologiques aux points de grille sont des valeurs de variables climatologiques mesurées en surface ou en altitude (par exemple la température de l'air, l'humidité atmosphérique ou la température de la mer en surface) ou d'indices climatiques (par exemple le nombre de jours de gel) reportées sur une grille régulière de couverture variable (locale à régionale ou mondiale). Outre la couverture, la résolution des données aux points de grille peut varier d'autant que quelques mètres carrés dans le cas des jeux de données concernant des zones suburbaines à 200 à 300 km dans celui des jeux de données d'échelle mondiale. De la même manière, la résolution temporelle peut varier de quelques minutes à plusieurs années.

Parce que les données climatologiques aux points de grille sont par essence une solution de remplacement des mesures instrumentales, indépendamment du fait que les données aux points de grille soient obtenues ou non à partir d'observations originales au moyen de techniques d'interpolation (voir 5.9) ou à partir des sorties de modèles climatiques numériques ou statistiques, elles font souvent l'objet d'une validation. Cette validation s'effectue par comparaison avec des observations en surface ou en altitude réalisées par des stations climatologiques dont l'emplacement coïncide avec un point de grille particulier ou s'en approche.

Un certain nombre d'organismes contribuent à la production de jeux de données climatologiques aux points de grille, par exemple des centres climatologiques nationaux ou régionaux et des groupes de recherche universitaires. Certains jeux de données sont actualisés régulièrement ou périodiquement, alors que d'autres ne le sont pas ou contiennent des séries chronologiques de variables climatologiques.

Les jeux de données aux points de grille facilitent l'analyse spatiale des variables climatologiques et la visualisation statique ou dynamique des régimes et tendances climatiques.

6.2.1 Jeux de données aux points de grille fondés sur des observations

En matière d'analyse climatologique, une cause de frustration bien connue est le caractère discontinu des données, aussi bien dans le temps que dans l'espace, dû à la répartition géographique et temporelle inégale des observations du climat. Au cours des quelques dix dernières années, non seulement les systèmes de réanalyse ont ouvert de nouvelles possibilités pour l'analyse climatique (voir 6.2.4), mais la mise à disposition de jeux de données climatologiques aux points de grille fondés sur des observations a contribué à résoudre certains des problèmes posés par le caractère incomplet des données d'observation. Alors que certains de ces jeux de données sont fondés exclusivement sur des observations en surface, d'autres sont des jeux de données résultant du mélange d'observations en surface et d'observations réalisées à partir de plates-formes satellitaires. En général, les jeux de données climatologiques aux points de grille fondés sur des observations sont composés de valeurs interpolées issues de stations pour lesquelles les données ont été ajustées et homogénéisées.

On trouvera quelques exemples de jeux de données climatologiques aux points de grille fondés sur des observations de portée mondiale et régionale dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1. Exemples de jeux de données climatologiques aux points de grille fondés sur des observations de portée mondiale et régionale

<i>Jeu de données de portée mondiale</i>	<i>Variables</i>	<i>Couverture temporelle</i>	<i>Couverture spatiale</i>
Centre de prévision du climat (CPC): analyse récapitulative des précipitations (CMAP) ^a	Moyennes mensuelles et pentadaires des précipitations aux points de grille à l'échelle mondiale	Valeurs mensuelles: janvier 1979–septembre 2017 Valeurs pentadaires: janvier 1979–27 décembre 2016 Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1981–2010	Grille mondiale, 2,5 degrés de latitude par 2,5 degrés de longitude
CPC: humidité du sol ^a	Humidité du sol	Moyennes mensuelles: janvier 1948–août 2017 Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1981–2010	Grille mondiale, 0,5 degré de latitude par 0,5 degré de longitude
CRU TS v. 4.01 ^b	pre, tmp, tmx, tmn, dtr, vap, cld, wet, frs, pet*	Séries chronologiques pour la période 1901–2016	Ensemble des terres émergées, 0,5 degré de latitude par 0,5 degré de longitude
CRU CY v. 4.01, grille mondiale longitude ^b	pre, tmp, tmx, tmn, dtr, vap, cld, wet, frs, pet*	Valeurs moyennes: 1901–2015	Pays
GHCN ^c , anomalies de précipitations (V2) et de température (V3) sur les terres émergées aux points de grille	Précipitations et température mensuelles	Anomalies mensuelles: de 1900 à mai 2015 (précipitations) De 1880 à juillet 2016 (température) Moyennes mensuelles de 1900 à mai 2015 (précipitations seulement)	Grille mondiale, 5,0 degrés de latitude par 5,0 degrés de longitude
GHCN_CAMS ^d , température à 2 m aux points de grille (terres émergées)	Températures analysées à la surface des terres émergées	Moyennes mensuelles de 1948 à septembre 2017 Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1981–2010	Grille mondiale, 0,5 degré de latitude par 0,5 degré de longitude

<i>Jeu de données de portée mondiale</i>	<i>Variables</i>	<i>Couverture temporelle</i>	<i>Couverture spatiale</i>
Centre mondial de climatologie des précipitations (GPCC) ^e	Jeu de données mensuelles sur les précipitations, issues de stations	De 1901 à nos jours Valeurs mensuelles: janvier 1901 à 2013 (V7 complète) Valeurs mensuelles: janvier 2007 jusqu'au présent proche (surveillance) Valeurs mensuelles: janvier 2014 jusqu'au présent proche (première approximation)	Grille mondiale, 0,5 degré de latitude par 0,5 degré de longitude Grille mondiale, 1,0 degré de latitude par 1,0 degré de longitude Grille mondiale, 2,5 degrés de latitude par 2,5 degrés de longitude
NOAA, rayonnement ascendant de grandes longueurs d'onde (OLR) interpolé ^a	Données OLR quotidiennes et mensuelles aux points de grille	Valeurs mensuelles: juin 1974 à décembre 2013 Valeurs quotidiennes: juin 1974–31 décembre 2013 Moyennes à long terme des valeurs mensuelles et quotidiennes: 1981–2010	Grille mondiale, 0,5 degré de latitude par 0,5 degré de longitude
Kaplan, température de la mer en surface (SST) étendue, V2 ^a	Anomalies mondiales de la SST aux points de grille de 1856 à nos jours, tirées des données sur la SST du Met Office (Royaume-Uni)	Janvier 1856 à septembre 2017	Grille mondiale, 5,0 degrés de latitude par 5,0 degrés de longitude
NOAA, SST reconstituée et étendue (ERSST), V3b ^a	Analyse de la SST mensuelle à l'échelle mondiale de 1854 à nos jours, à partir de l'ensemble international intégré de données sur l'océan et l'atmosphère (ICOADS) avec détermination des données manquantes par des méthodes statistiques	Valeurs mensuelles: janvier 1854 à nos jours Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1971–2000 Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1981–2010	Grille mondiale, 2,0 degrés de latitude par 2,0 degrés de longitude
NOAA, ERSST, V5 ^a	Analyse de la SST mensuelle à l'échelle mondiale de 1854 à nos jours, à partir de l'ICOADS avec détermination des données manquantes par des méthodes statistiques	Valeurs mensuelles: janvier 1854 à nos jours Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1981–2010	Grille mondiale, 2,0 degrés de latitude par 2,0 degrés de longitude

<i>Jeu de données de portée mondiale</i>	<i>Variables</i>	<i>Couverture temporelle</i>	<i>Couverture spatiale</i>
CPC, analyse des précipitations quotidiennes au moyen de pluviomètres unifiés à l'échelle mondiale ^a	Analyse des précipitations quotidiennes au moyen de pluviomètres unifiés à l'échelle mondiale	Valeurs quotidiennes: 1 ^{er} janvier 1979 à nos jours Moyennes à long terme des valeurs quotidiennes et mensuelles pour la période 1981–2010	Grille, 0,5 degré de latitude par 0,5 degré de longitude
CPC, température quotidienne moyenne ^a	Température quotidienne moyenne sur les terres émergées	Valeurs quotidiennes: 1 ^{er} janvier 1979 à nos jours Moyennes à long terme des valeurs quotidiennes et mensuelles pour la période 1981–2010	Grille, 0,5 degré de latitude par 0,5 degré de longitude
NOAA, SST par interpolation optimale, V2 ^a	Température de la mer en surface	Moyennes hebdomadaires: 29 octobre 1981–28 décembre 1989 Moyennes mensuelles: décembre 1981–septembre 2017 Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1961–1990 Moyennes mensuelles à long terme calculées à partir des données pour la période 1971–2000	Grille mondiale, 1,0 degré de latitude par 1,0 degré de longitude
NOAA, relevé de données climatologiques quotidiennes sur le rayonnement ascendant de grande longueur d'onde: version interpolée de la Division des sciences physiques (PSD) ^a	Valeur interpolée quotidienne du rayonnement ascendant de grande longueur d'onde 1x1 aux points de grille	Valeurs quotidiennes: 1 ^{er} janvier 1979–12 janvier 2012 Valeurs mensuelles: 1 ^{er} janvier 1979–12 janvier 2012 Moyennes mensuelles à long terme pour la période 1981–2010	Grille mondiale, 1,0 degré de latitude par 1,0 degré de longitude

<i>Jeu de données de portée régionale</i>	<i>Variables</i>	<i>Couverture temporelle</i>	<i>Couverture spatiale</i>
Canada, anomalies de la température et des précipitations aux points de grille (CANGRD) ^f	Anomalies de la température et des précipitations aux points de grille	Anomalies annuelles, saisonnières et mensuelles de la température et des précipitations: 1901–2003	Résolution de 10 km
CPC, Etats-Unis, précipitations horaires ^a	Précipitations	Valeurs horaires: janvier 1948–septembre 2002	Grille américaine (33x21), 2,0 degrés de latitude par 2,5 degrés de longitude 20,0°–60,0° N, 220,0°–297,5° E

<i>Jeu de données de portée régionale</i>	<i>Variables</i>	<i>Couverture temporelle</i>	<i>Couverture spatiale</i>
E (Europe)-OBS, jeu de données aux points de grille, V16 ^g	Température moyenne, minimale et maximale, somme des précipitations et niveau moyen de la mer	Valeurs quotidiennes: 1 ^{er} janvier 1950–31 août 2017	Grille régulière latitude-longitude 0,25 et 0,5 degré et grille polaire orientée 0,22 et 0,44 degré
Afrique, climatologie des précipitations, ARC2 ^h	Précipitations	Valeurs quotidiennes: 1 ^{er} janvier 1960, 12:00:00 se suivant du 1 ^{er} janvier 1983 au 1 ^{er} novembre 2018	De 20° W à 55° E par intervalles de 0,1 degré
PSD, Amérique du Sud, précipitations quotidiennes aux points de grille ^a	Précipitations	Valeurs quotidiennes: janvier 1940–avril 2012	Terres émergées uniquement 60° S–15° N 85° W–30° W Grilles de 1,0 et 2,5 degrés
Australie, variabilité de la hauteur de pluie aux points de grille ⁱ	Hauteur de pluie	Indices relatifs à la variabilité trimestrielle et annuelle de la hauteur de pluie	Grilles de 0,25°/25 km
Intégration des données d'observation à haute résolution sur les précipitations en Asie aux fins d'évaluation des ressources en eau (APHRODITE) (APHRO_MA/ME/RU_V 1101R1) ^j	Précipitations	Valeurs quotidiennes: 1951–2007	Varie selon le produit

^a Laboratoire de recherche sur le système terrestre (ESRL) relevant de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA), Division des sciences physiques (PSD)

^b Unité de recherche sur le climat, Université d'East Anglia

^c Réseau mondial de données climatologiques anciennes (GHCN), centres nationaux d'information sur l'environnement (NECI), NOAA

^d Système de surveillance des anomalies climatiques (CAMS)

^e Service météorologique allemand

^f Environnement et Changement climatique Canada

^g Projet d'évaluation du climat européen et de jeux de données (ECA&D)

^h Centre de prévision du climat de la NOAA

ⁱ Bureau météorologique australien

^j Institut de recherche sur l'homme et la nature (RIHN) et Institut de recherche météorologique du Service météorologique japonais (JMA)

* Abréviations utilisées par la Section de recherche sur le climat de l'Université d'East Anglia; pre: précipitations; tmp: température moyenne à 2 m.; tmx: température maximale quotidienne à 2 m.; tmn: température minimale quotidienne à 2 m.; dtr: amplitude diurne de la température; vap: pression de vapeur; cld: nébulosité; wet: nombre de jours de pluie; frs: nombre de jours de gel; pet: évapotranspiration potentielle (*NdT*).

6.2.2 Jeux de données aux points de grille fondés sur des modèles climatiques

Il existe une multitude de modèles, aussi bien numériques que statistiques, du climat passé, présent et futur à toute une série d'échelles géographiques et temporelles, lesquels ont tous des sorties sous forme de données aux points de grille qui leur sont associées. Bien que les données de modèle soient une représentation numérique ou statistique des conditions climatiques actuelles, l'un des avantages que présente la modélisation du climat est la vaste gamme des variables climatologiques – bien plus nombreuses que celles qui sont observées au moyen d'instruments classiques – qui peuvent constituer des sorties de modèle et sont donc disponibles en tant que jeux de données aux points de grille. Quelques exemples de ces jeux de données fondés sur des modèles climatiques sont donnés dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2. Exemples de jeux de données aux points de grille de portée mondiale et régionale fondés sur des modèles climatiques

Jeu de données	Variables	Couverture temporelle	Couverture spatiale
Cinquième phase du projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5) ^a	Ensemble complet de variables en surface et en altitude issues de 62 modèles climatiques	Simulations climatiques quotidiennes, mensuelles, à long terme (à l'échelle du siècle) et à court terme (10 à 30 ans)	Grille mondiale, de dimension variant de 1,5 à 3,5 degrés
Expérience coordonnée de modélisation du climat régional (CORDEX) ^b	Ensemble complet de variables en surface et en altitude issues de 54 modèles climatiques régionaux	Simulations climatiques à des intervalles de trois heures et de six heures, quotidiennes, mensuelles, à long terme (à l'échelle du siècle) et à court terme (10 à 30 ans)	Quatorze régions à une dimension de grille de 50 km/0,5 degré

^a Programme de comparaison et de diagnostic des modèles climatiques, Laboratoire national de Lawrence Livermore, Livermore, Californie, États-Unis

^b Institut météorologique et hydrologique suédois, Norrköping

6.2.3 Données de simulation rétrospective

Une simulation rétrospective est une prévision d'un événement passé dans laquelle seules les observations antérieures à l'événement sont prises en compte dans le système utilisé pour formuler la prévision (GIEC, 2013; OMM, Meteoterm). On parle parfois à ce sujet de «reprévisions», qui sont des jeux de données normalisés servant à améliorer les prévisions météorologiques (Hamill *et al.*, 2006). Ce sont des prévisions météorologiques *a posteriori* produites au moyen de la même version du modèle de prévision numérique du temps que celle utilisée pour les prévisions météorologiques en temps réel à l'examen. Il est possible d'utiliser une série de simulations rétrospectives pour évaluer un système de prévision et/ou mesurer la capacité moyenne que le système de prévision a montrée par le passé aux fins d'indication sur la performance à laquelle on peut s'attendre à l'avenir.

La qualité d'une prévision correspond à sa pertinence par rapport aux informations tirées des observations. On peut analyser les prévisions d'événements passés, c'est-à-dire les simulations rétrospectives ou prévisions *a posteriori*, pour avoir une idée plus précise de la qualité que l'on peut attendre des prévisions futures concernant une variable particulière en un lieu donné. Quelques exemples permettront d'illustrer l'importance des simulations rétrospectives ou prévisions *a posteriori* comme moyen de mieux connaître les mécanismes physiques régissant des processus particuliers ou de faciliter la détermination des erreurs systématiques dans les expériences de modélisation.

À titre d'exemple d'application de la technique, Katragkou *et al.* (2015) présentent six simulations rétrospectives réalisées par le modèle de recherche et prévision météorologiques (WRF) dans le cadre de l'expérience coordonnée de modélisation du climat régional pour l'Europe (EURO-CORDEX) avec différentes configurations en matière de microphysique, convection et rayonnement pour la période 1990-2008, dans le but de détecter les erreurs systématiques et les domaines de forte incertitude propres au climat européen actuel et de les relier à des processus physiques particuliers (les relations entre les nuages et le rayonnement ou entre les terres émergées et l'atmosphère, par exemple).

Une autre étude de Dake *et al.* (2004) présente des simulations rétrospectives des fluctuations interannuelles du climat dans la partie tropicale de l'océan Pacifique pour la période 1857-2003, obtenues au moyen d'un modèle couplé océan-atmosphère. Le modèle parvient à prévoir tous les principaux épisodes El Niño de cette période jusqu'à deux ans d'échéance. Ces résultats démontrent que l'évolution du phénomène est davantage régie par sa propre dynamique interne que par le forçage stochastique.

En matière d'application, les études par simulation rétrospective de l'énergie des vagues dans des zones côtières particulières sur de courtes périodes facilitent la détermination de la variabilité et des tendances d'une zone à l'autre, ce qui conduit à la caractérisation du climat des vagues, qui est un moyen essentiel d'évaluer la puissance des vagues.

6.2.4 **Produits de réanalyse**

Lorsqu'on parle d'analyse et de prévision numériques du temps à caractère opérationnel, l'analyse est le processus qui permet de proposer une représentation, cohérente sur le plan interne, de l'environnement sur une grille à quatre dimensions. Compte tenu du caractère d'actualité de la prévision météorologique, l'analyse de départ doit en général débuter avant qu'on dispose de toutes les observations requises. La réanalyse fait appel au même processus (et souvent aux mêmes systèmes), mais comme elle se déroule plusieurs semaines, voire plusieurs années plus tard, elle repose sur un jeu plus complet d'observations. Les systèmes de réanalyse comprennent en général un modèle de prévision chargé de décrire comment évolue l'environnement dans le temps, tout en conservant une certaine cohérence interne. Par opposition aux analyses sur lesquelles reposent la prévision numérique opérationnelle, pour laquelle on actualise en permanence les modèles afin de tenir compte des derniers progrès accomplis par la recherche, on procède à une réanalyse en utilisant un système de modélisation fixe tout au long de la période de réanalyse afin d'éviter les ruptures d'homogénéité qu'on trouve en général dans les jeux de données opérationnels, en raison des modifications que subissent les modèles au fil du temps.

Les résultats d'une réanalyse figurent sur une grille uniforme et il n'y manque aucune donnée. Il importe de noter que les valeurs de réanalyse ne sont pas des données «réelles», mais plutôt des valeurs estimées de données réelles fondées sur des données d'observation inégalement réparties. Les résultats se présentent sous la forme d'un relevé historique intégré de l'état de l'environnement atmosphérique, composé d'un ensemble de données ayant toutes fait l'objet du même traitement. On se sert fréquemment des résultats de réanalyses en remplacement des données d'observation, mais cela exige certaines précautions. Bien que les algorithmes d'analyse reposent en grande partie sur les observations disponibles, dans les régions où ces observations sont rares, la grille issue d'une réanalyse est fortement conditionnée par le modèle de prévision. Quand les projets de réanalyse portent sur plusieurs décennies, on constate en général beaucoup d'hétérogénéité touchant le type et la couverture des données au cours de la période examinée, notamment entre les périodes antérieures et postérieures à l'observation par satellites. Par ailleurs, l'influence relative des observations et du modèle varie suivant les variables climatiques; certaines variables sont fortement influencées par les données d'observation utilisées, tandis que d'autres sont uniquement issues du modèle. Il faut bien tenir compte de ces éléments quand il s'agit d'interpréter les produits de réanalyse. À titre d'exemple, les réanalyses de variables dynamiques donnent de bien meilleurs résultats que les réanalyses de précipitations, en partie parce que les processus des précipitations sont mal représentés par les modèles.

Les résultats des réanalyses présentent aussi des limites, surtout évidentes dans des régions à l'orographie complexe (en particulier, dans les régions montagneuses), ainsi que dans d'autres régions, quand les programmes d'assimilation et de traitement sont incapables, en raison du lissage, de reproduire les processus atmosphériques réels, caractérisés par un fort gradient spatial et temporel. Le problème de la localisation suivant des échelles spatiales et temporelles plus fines que la grille de réanalyse reste aussi d'actualité. On s'efforce à l'heure actuelle d'exécuter des «réanalyses régionales» à partir de données d'observation locales et à l'aide de modèles haute résolution à domaine limité. Comme c'est le cas pour toute autre technique d'analyse, la validation des modèles, l'assurance de la qualité et les indicateurs d'erreurs sont nécessaires si l'on veut pouvoir interpréter correctement les résultats obtenus.

Pour créer des bases de données environnementales permettant de mieux évaluer les changements systématiques, on a recours à des informations issues non seulement des sciences atmosphériques, mais aussi de l'océanographie, de l'hydrologie et de la télédétection. À l'heure actuelle, les principales bases de données de réanalyse, d'échelle mondiale, sont celles établies par le Centre national de recherche atmosphérique et les centres nationaux de prévision environnementale, aux États-Unis d'Amérique, ainsi que par le Centre européen

pour les prévisions météorologiques à moyen terme et par le Service météorologique japonais (tableau 6.3). Les résultats de tous ces efforts de réanalyse ont été largement utilisés dans la surveillance du climat, les études de la variabilité du climat et la prévision des changements climatiques. Il importe d'évaluer dans quelle mesure relative les techniques de réanalyse parviennent à représenter les caractéristiques observées dans une région donnée, avant d'en utiliser les résultats dans le cadre d'études climatologiques. Une meilleure connaissance des processus physiques, chimiques et biologiques qui conditionnent l'environnement, combinée à des données provenant d'un large éventail de sources différentes, bien au-delà des sciences atmosphériques, devrait se traduire par de nouvelles améliorations des bases de données de réanalyse. Des produits de réanalyse plus précis et plus détaillés apparaîtront au fur et à mesure qu'on perfectionnera les modèles numériques et que les capacités de calcul gagneront en puissance pour atteindre de meilleures résolutions.

Tableau 6.3. Systèmes mondiaux et régionaux de réanalyse

Système de réanalyse	Origine	Période	Site Web
ASR ^a	Université d'État de l'Ohio	2000–2012	http://rda.ucar.edu/datasets/ds631.4/
CFSR ^b	NOAA/NCEP (CDAS-T382) ^c	Janvier 1979–décembre 2010	http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr
CFSv2	NOAA/NCEP (CDAS-T574)	Janvier 2011 à nos jours	http://cfs.ncep.noaa.gov/
Réanalyse régionale COSMO (Europe)	Centre Hans-Ertel, Service météorologique allemand (DWD), Université de Bonn	1995 à nos jours	http://reanalysis.meteo.uni-bonn.de/?Overview
ERA-20Ca	CEPMMT ^d	Janvier 1900–décembre 2010	http://apps.ecmwf.int/datasets/
ERA-40	CEPMMT	Septembre 1957–août 2002	http://apps.ecmwf.int/datasets/
ERA-Interim	CEPMMT	Janvier 1979 à nos jours	http://apps.ecmwf.int/datasets/
JRA-25/JCDAS ^e	JMA ^f et CRIEPI ^g (JRA-25)	Janvier 1979–janvier 2014	http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html
JRA-55b ^h	JMA	Janvier 1958 à nos jours	http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html
MERRA ⁱ	GMAO de la NASA ^j	Janvier 1979–février 2016	https://gmao.gsfc.nasa.gov/merra/
MERRA-2c	GMAO de la NASA	Janvier 1980 à nos jours	https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/
NCEP-DOE ^k R2	NCEP de la NOAA et projet DOE AMIP ^l –II (R2)	Janvier 1979 à nos jours	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html
NCEP-NCAR ^m R1,	NCEP de la NOAA et NCAR (R1)	Janvier 1948 à nos jours	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html
NCEP NARR ⁿ	NCEP	1979 jusqu'à récemment	http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rreanal/
NOAA-CIRES ^o 20CR v2d,	NOAA et CIRES (Université du Colorado) (20CR)	Novembre 1869–décembre 2012	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2c.html

^a Réanalyse du système arctique (ASR)

^b Réanalyse du système de prévision du climat (CFSR)

^c Système d'assimilation des données climatologiques (CDAS) des centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA)

^d Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT)

^e Projet de réanalyse japonaise sur 25 ans (JRA-25)/ Système d'assimilation des données climatologiques du Service

- f météorologique japonais (JMA) (JCDAS)
- g Service météorologique japonais (JMA)
- h Institut central de recherche de l'industrie de l'électricité (CRIEPI)
- i Projet de réanalyse japonaise sur 50 ans (JRA-50)
- j Analyse rétrospective de l'ère moderne à des fins de recherche et d'applications (MERRA)
- k Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) de l'Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace (NASA)
- l Département de l'énergie (DOE) des États-Unis
- m Projet de comparaison des modèles de l'atmosphère (AMIP)
- n Centre national de recherche atmosphérique (NCAR)
- o Projet de réanalyse régionale pour l'Amérique du Nord (NARR)
- p Institut coopératif de recherche en sciences de l'environnement (CIRES), Université du Colorado

6.3 MODÈLES CLIMATIQUES ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DU CLIMAT

Grâce aux modèles climatiques, il est possible de simuler et d'étudier le système climatique, son comportement, ses composantes et leurs interactions, ainsi que son évolution future possible. Les connaissances sur le système climatique ayant bien progressé et les outils de calcul étant devenus de plus en plus puissants et rapides, la mise au point de modèles climatiques d'une résolution et d'une complexité accrues devient possible. Les modèles peuvent servir à une série d'applications, y compris des prévisions et projections climatiques, après examen et validation de leurs modes de représentation de certains éléments et processus du système climatique.

Les perspectives d'évolution du climat indiquant la valeur moyenne ou cumulée attendue d'un élément climatique, généralement sur une période de quelques mois à plusieurs années, sont déduites de l'analyse et de l'interprétation des observations et des sorties de modèles.

Parmi les modèles les plus simples figurent ceux qui reposent sur des relations empiriques ou statistiques entre des champs à grande échelle (températures à la surface de la mer, vents, etc.) et des variables météorologiques en surface (hauteur de précipitation, température, vitesse du vent). Les modèles les plus complexes, à savoir les modèles climatiques mondiaux (voir 6.3.4), simulent, à partir d'analyses et de couplages, l'intégralité du système climatique pour l'ensemble du globe et servent à prévoir le climat à venir de façon explicite ou selon certaines hypothèses de départ. Les modèles climatiques régionaux se concentrent sur la représentation du climat à des échelles spatiales plus fines et pour une zone relativement restreinte. L'utilisation de modèles climatiques mondiaux et/ou régionaux est désignée sous le nom d'approche dynamique. Dans certains cas, on a recours à une approche hybride (combinant les méthodes statistique et dynamique). Cette méthode utilise les relations entre les sorties des modèles climatiques mondiaux et les données historiques. Comme les prévisions numériques émanant des modèles climatiques mondiaux nécessitent d'énormes capacités de calcul, seul un petit nombre de centres climatologiques dans le monde sont en mesure d'en produire. En général, on utilise abondamment tous ces modèles afin de mieux cerner les perspectives d'évolution du climat.

6.3.1 Produits concernant l'évolution probable du climat

Les perspectives d'évolution du climat sont des prévisions portant sur les valeurs moyennes ou cumulées des éléments climatiques sur des échelles de temps allant d'un mois environ à plusieurs années. Les prévisions saisonnières sont les plus courantes et peuvent en général faire l'objet d'une diffusion mensuelle. Sinon, quelques prévisions sont diffusées uniquement pour des saisons précises ou à d'autres intervalles définis à l'avance. Les éléments climatiques que l'on prévoit sont en général la température moyenne de l'air en surface et la précipitation totale. Certains centres établissent aussi de plus en plus souvent des prévisions relatives à d'autres paramètres tels que le nombre de jours de précipitations, les chutes de neige, la fréquence des cyclones tropicaux et le début et la fin des moussons.

Les prévisions de la température de la mer en surface en zone tropicale peuvent aussi être considérées comme des produits de prévision climatique compte tenu de l'importance du forçage de la température de la mer en surface dans les régions tropicales. Les prévisions relatives au phénomène ENSO sont particulièrement recherchées et sont largement diffusées par la plupart des centres mondiaux de production de prévisions à longue échéance (GPCLRF) et par

d'autres institutions internationales. En dernier ressort, l'élément prévu, la fréquence et le délai d'échéance peuvent varier selon les caractéristiques du climat d'un pays ou d'une région donnée et, surtout, devraient se rapporter aux besoins des utilisateurs.

L'Organisation météorologique mondiale collabore avec ses Membres à la production de perspectives d'évolution saisonnière à l'échelle mondiale telles que les bulletins Info-Niño/Niña et les bulletins saisonniers sur le climat (GSCU). Les bulletins Info-Niño/Niña sont des produits consensuels fondés sur les contributions d'un réseau mondial de centres de prévision et donnent des indications sur la phase et l'intensité du phénomène ENSO. Les bulletins saisonniers sur le climat donnent un aperçu de l'état actuel et de l'évolution future prévue du climat saisonnier du point de vue des principales caractéristiques de la circulation générale et des anomalies océaniques de grande ampleur à l'échelle mondiale ainsi que de leurs incidences probables sur les régimes de température et de précipitations à l'échelle continentale. Ils sont élaborés dans le cadre d'une action concertée menée en particulier par le Centre principal pour les prévisions d'ensemble multimodèle à longue échéance (LC-LRFMME) de l'OMM, les GPCLRF et la NOAA. Il y a lieu de considérer ces deux types de bulletins comme une source d'information venant en complément des perspectives plus détaillées d'évolution saisonnière du climat à l'échelle régionale et nationale, notamment celles émanant des forums régionaux sur l'évolution probable du climat et des SMHN.

Les prévisions climatiques opérationnelles sont produites par les SMHN, les centres climatologiques régionaux (CCR), les GPCLRF et d'autres institutions internationales. Ces institutions sont censées fournir leurs prévisions conformément aux dispositions du *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision* (OMM-N° 485). Le Système mondial de traitement des données et de prévision comprend les centres météorologiques mondiaux (CMM), les centres météorologiques régionaux spécialisés (CMRS) et les SMHN, qui remplissent des fonctions aux niveaux mondial, régional et national (voir figure 6.1). Il représente les interactions qui peuvent être anticipées lorsque l'on fournit une prévision: les produits concernant l'évolution probable du climat issus d'un modèle climatique mondial font l'objet d'une réduction d'échelle au niveau régional, puis au niveau national. Plusieurs SMHN établissent des prévisions pour leur propre pays à partir de produits émanant des GPCLRF, des CCR et d'autres institutions internationales.

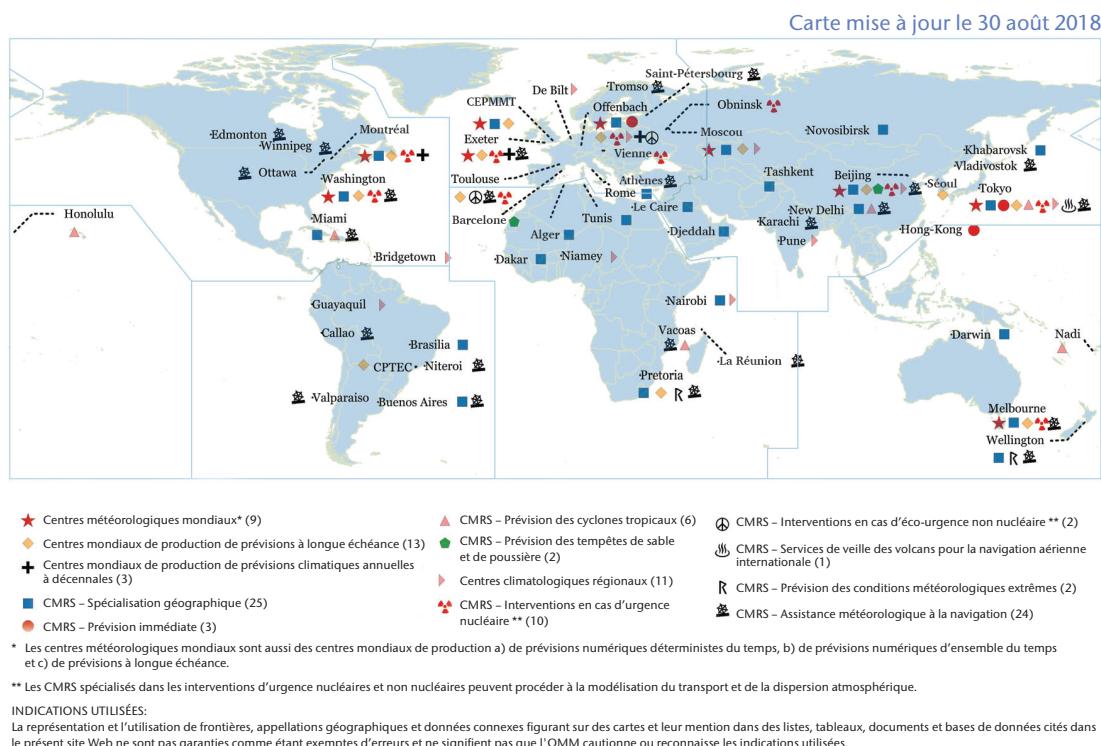


Figure 6.1. Centres du Système mondial de traitement des données et de prévision de l'OMM

Les produits de prévision peuvent être fournis directement à des utilisateurs particuliers, et les Services climatologiques sont alors souvent appelés à leur en donner l'interprétation nécessaire (voir chapitre 7). Parallèlement, les forums régionaux sur l'évolution probable du climat élaborent en coopération des produits consensuels sur le climat fondés sur les contributions (les prévisions climatiques) des spécialistes nationaux, régionaux et internationaux du climat. En rassemblant des pays qui présentent des caractéristiques climatologiques similaires, les forums assurent la cohérence voulue pour ce qui concerne l'accès à l'information climatologique et son interprétation. De surcroît, les échanges avec les utilisateurs des principaux secteurs économiques de chaque région, les services de vulgarisation et les décideurs permettent aux forums d'évaluer les conséquences probables des perspectives d'évolution pour les secteurs économiques les plus concernés d'une région donnée et de préciser la façon dont ceux-ci pourraient en tirer profit. Les nouveaux médias et l'Internet sont d'autres moyens courants de diffuser les prévisions à l'intention du public.

Le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC) comprend plusieurs projets destinés à faciliter l'élaboration des perspectives d'évolution du climat à diverses échelles de temps. Par exemple, le Projet de recherche sur la prévision infrasaisonnière à saisonnière, lancé en 2013, étudie les sources de prévisibilité à l'échelle de temps infrasaisonnière à saisonnière. Le Projet de prévisions climatiques décennales, qui utilise les modèles climatiques mondiaux pour étudier la possibilité d'obtenir des prévisions pluriannuelles et décennales, a été intégré dans le plan d'expérience du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP). L'une de ses composantes consiste dans la production, l'analyse et la diffusion en cours de prévisions multimodèles expérimentales en temps quasi réel susceptibles de servir de base pour la production éventuelle de prévisions opérationnelles. Ces activités concourent au grand défi du PMRC visant la prévision du climat à moyen terme, qui est destiné à combler une importante lacune dans la fourniture d'informations climatologiques sans discontinuité, laquelle se situe entre les prévisions climatiques saisonnières à interannuelles, d'une part, et les projections concernant l'évolution du climat sur plusieurs décennies ou à plus long terme, d'autre part. Ces efforts visent à assurer des services climatologiques sans discontinuité, comme le recommande le Cadre mondial pour les services climatologiques (CMSC).

En matière de prévision climatique, l'incertitude est inévitable, compte tenu de la nature chaotique de l'atmosphère, des difficultés liées aux données d'observation (qualité, période couverte, densité du réseau, possibilités d'accès aux métadonnées, échantillonnage insuffisant des phénomènes extrêmes, etc.) et des approximations des modèles de prévision. Les incertitudes peuvent être aussi liées au délai d'échéance, à la variable que l'on cherche à obtenir et aux échelles temporelle et spatiale. Cela étant, les prévisions déterministes sont généralement peu fiables. Toutefois, les prévisions assorties d'estimations de l'incertitude telles que les prévisions probabilistes sont essentielles. Les éléments prévus sont généralement présentés selon des catégories telles que «valeur supérieure à la normale», «valeur proche de la normale» et «valeur inférieure à la normale». La prévision probabiliste indique la probabilité d'occurrence de la catégorie. Une autre forme de présentation consiste à indiquer la catégorie la plus probable. Les prévisions probabilistes sont cependant plus difficiles à appliquer; les utilisateurs doivent être convenablement informés des avantages et des inconvénients de ce type de prévision, ainsi que des méthodes d'analyse coûts-avantages. Lorsque des prévisions donnent des valeurs numériques pour certains éléments, on peut exprimer l'incertitude sous la forme d'un intervalle de confiance ou en adjoignant à la prévision les données statistiques de vérification des prévisions passées. Il appartient aux Services climatologiques de prendre aussi en compte, s'agissant de l'utilisation des prévisions probabilistes, les résultats des expériences de vérification des prévisions passées.

6.3.2 Prévisions et projections climatiques

D'une manière générale, une prévision est la sortie d'un modèle qui calcule l'évolution des paramètres choisis depuis les conditions initiales jusqu'à l'état final à une échelle de temps saisonnière, annuelle ou décennale. Pour une telle prévision, on suppose que les facteurs autres que ceux qui sont pris en compte explicitement ou implicitement dans le modèle de prévision n'auront pas d'influence marquée sur ce qui doit se produire. En ce sens, une prévision est principalement influencée par les conditions actuelles que les observations permettent de

connaître (les conditions initiales) et par les hypothèses formulées au sujet des processus physiques qui détermineront les évolutions futures. Par exemple, une prévision climatique selon laquelle un épisode ENSO majeur se développera dans les mois à venir est principalement déterminée par l'état du système climatique observé actuellement et dans un passé récent. Les petites variations susceptibles de se produire au cours des mois à venir ainsi que d'autres facteurs qui peuvent exercer une influence à des échelles de temps plus longues, notamment les activités humaines (conditions aux limites), ont probablement une importance moindre dans le cas d'une prévision climatique.

Les prévisions peuvent être formulées selon une approche déterministe ou probabiliste. Une prévision déterministe présente une seule valeur se rapportant à une période précise. Une prévision probabiliste donne une série de valeurs possibles sur une période donnée. Une prévision acquiert un caractère probabiliste en tenant compte de différentes sortes d'incertitude. Une prévision probabiliste est composée de plusieurs prévisions issues d'un modèle climatique présentant au départ des conditions initiales légèrement différentes (tant atmosphériques qu'océaniques) et produisant une série (ou «ensemble») de prévisions. En bonne logique, l'échantillonnage relatif à l'incertitude du modèle est aussi évalué au moyen de plusieurs modèles (ensembles multimodèles). On trouvera des indications utiles à ce propos dans la publication intitulée *Principes directeurs relatifs aux systèmes de prévision d'ensemble et à la prévision d'ensemble* (OMM-N° 1091). Une prévision climatique est un énoncé de la probabilité que quelque chose se produise, indépendamment de toute intervention humaine. Cela a son importance pour les décideurs, dont les actions n'auraient ainsi aucune incidence sur les phénomènes météorologiques ou climatiques.

Une projection climatique est en général une déclaration probabiliste portant sur les échelles de plusieurs décennies à plusieurs siècles et reposant sur des hypothèses au sujet de conditions déterminantes. Par opposition aux prévisions, les projections prennent spécifiquement en compte les variations importantes dans un ensemble de conditions aux limites, par exemple une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, pouvant avoir une influence sur le climat futur. Il en découle des espérances conditionnelles (si cela se produit, alors voici ce qu'il faut prévoir). Pour les projections les plus lointaines, on met au point des scénarios (voir 6.3.3) reposant sur différentes hypothèses ou appréciations.

Comme pour les prévisions climatiques, l'incertitude inhérente aux projections devrait être évaluée au moyen des différents scénarios possibles et de plusieurs modèles, de manière à pouvoir échantillonner aussi l'incertitude des modèles. Pour les décideurs, les projections indiquent les effets auxquels pourraient contribuer des mesures précises prises en application des politiques adoptées.

6.3.3 Scénarios climatiques

Les modèles climatiques mondiaux servent très fréquemment à établir des scénarios climatiques. En parlant de scénario climatique, on se réfère à un climat futur plausible envisagé pour analyser les conséquences probables de changements climatiques d'origine humaine, mais qui représente aussi les conditions futures découlant de la variabilité naturelle du climat. Les rapports et publications du GIEC (par exemple GIEC, 2013) constituent une bonne source d'information au sujet des scénarios climatiques futurs à une échelle de temps de plusieurs décennies à un siècle. Par exemple, dans le *Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC* figurent des projections fondées sur une série de valeurs possibles du forçage radiatif en l'an 2100 par rapport aux valeurs préindustrielles (+ 2,6, + 4,5, + 6,0 et + 8,5 W/m²) (voir [Résumé à l'intention des décideurs](#), in *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques*, section E.7, tableau RID.3). Ces profils d'évolution sont appelés profils représentatifs d'évolution de concentration (respectivement RCP2,6, RCP4,5, RCP6,0 et RCP8,5). Ils servent d'entrées pour les modèles climatiques mondiaux dont les sorties et les analyses ultérieures permettent d'obtenir les descriptions de quatre futurs climatiques qui sont tous considérés comme possibles selon le volume des émissions de gaz à effet de serre dans les années à venir. Destinées à cerner plus précisément la façon dont ces RCP influeraient sur le climat au moyen de différents modèles climatiques présentant chacun sa propre sensibilité au climat, les projections concernant les changements climatiques prennent en compte un large éventail de possibilités raisonnables quant au développement de la société et au

comportement du climat. Si l'utilisation des RCP comme entrées des modèles climatiques est la dernière démarche adoptée pour obtenir des climats futurs possibles, les scénarios décrits dans le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES) font partie des précédentes entrées qui ont été très largement utilisées (A1B, B2, etc.).

6.3.4 Modèles climatiques mondiaux

Les modèles climatiques mondiaux (MCM) sont conçus principalement pour représenter les processus climatiques à l'échelle planétaire. Ils constituent le principal moyen d'étudier la variabilité du climat passé, présent et futur. Ils se fondent sur les lois physiques qui gouvernent les processus climatiques et les interactions entre toutes les composantes du système climatique, exprimées sous la forme d'équations mathématiques à trois dimensions. Pour résoudre ces équations déterminantes fortement non linéaires, on recourt au calcul numérique sur une grille à quatre dimensions représentant l'atmosphère (trois dimensions spatiales plus une dimension temporelle). De nombreux processus physiques, notamment les nuages pris individuellement, le phénomène de convection ou le phénomène de turbulence, se produisent à des échelles spatiales et temporelles trop petites pour pouvoir être directement pris en compte dans cette grille. Il faut pour cela avoir recours à une représentation simplifiée qualifiée de paramétrage: c'est une méthode employée pour remplacer des processus complexes à petite échelle présents dans le modèle par un processus simplifié.

Ces modèles ont commencé à voir le jour au cours des années 1960; ils se sont beaucoup perfectionnés grâce aux progrès rapides accomplis depuis lors. Leur développement s'est produit en parallèle avec celui des modèles de prévision numérique du temps. Au début, les modèles de la circulation générale (MCG) visaient à coupler l'atmosphère et l'océan. À présent, la plupart des MCM de la dernière génération comprennent des représentations de la cryosphère, de la biosphère, de la surface des terres émergées et de la chimie de l'atmosphère et des aérosols sous la forme de modèles intégrés de plus en plus complexes, appelés parfois modèles du système terrestre.

La confiance qu'il y a lieu d'accorder aux résultats que fournissent les MCM a considérablement augmenté grâce à des comparaisons systématiques de modèles (CMIP, etc.), à la capacité de certains modèles de reproduire les grandes tendances du climat du XX^e siècle et de certains paléoclimats et à la simulation améliorée de grandes caractéristiques de la circulation générale liées à des phénomènes tels que le phénomène ENSO. D'une façon générale, pour beaucoup de régions du globe, les MCM fournissent des simulations climatiques crédibles à des échelles spatiales sous-continentales et à des échelles temporelles de l'ordre de la saison à la décennie. On les considère par conséquent comme des outils capables de fournir des prévisions et des projections climatiques utiles. Les projections climatiques dont s'est servi le GIEC pour établir ses évaluations découlent de ces MCM, qui contribuent aussi pour beaucoup à l'élaboration des prévisions saisonnières opérationnelles par l'intermédiaire de la communauté des GPCLRF et des forums sur l'évolution probable du climat.

On s'intéresse de près à l'amélioration de la résolution spatiale des MCM, de façon à pouvoir simuler le climat à des échelles plus petites, auxquelles sont ressenties la plupart des incidences et auxquelles il est possible de mettre en œuvre des mesures d'adaptation. Les caractéristiques du climat à des échelle plus petites sont déterminées par l'interaction des forçages et des circulations à des échelles spatiales mondiale, régionale et locale et à des échelles temporelles allant d'une fraction de la journée à plusieurs décennies. Les forçages régionaux et locaux sont causés par les caractéristiques complexes de la topographie et de l'utilisation des sols, les interactions à l'interface terre-océan, les manifestations régionales et locales de la circulation atmosphérique telles que les brises marines et les tempêtes tropicales, la distribution des particules d'aérosols et des gaz de l'atmosphère et les effets des lacs, de la neige et des glaces de mer. Le climat d'une région donnée peut aussi subir une forte influence des processus de téléconnexion par forçage des anomalies en des lieux éloignés. Les processus sont souvent fortement non linéaires, ce qui rend la simulation et la prévision difficiles à l'échelle mondiale. Pour répondre à ces défis en matière de modélisation, on a mis au point des modèles climatiques régionaux (MCR) et des modèles de réduction d'échelle statistique afin d'obtenir des informations climatologiques à une résolution spatiale plus grande. Les modèles climatiques régionaux sont des modèles

haute résolution à domaine limité exploités en réseau et intégrés dans un modèle mondial de résolution moindre. La réduction d'échelle statistique consiste à appliquer, entre les deux échelles considérées, les relations statistiques qui ont été déterminées dans le climat observé. On peut recourir aux deux approches pour fournir des informations plus pertinentes aux échelles régionale et locale aux fins d'applications par l'intermédiaire de prévisions et de projections climatiques.

6.3.5 Réduction d'échelle: modèles climatiques régionaux

Les MCM ne peuvent fournir des informations directes à des échelles inférieures à leur propre résolution. Un processus dit de réduction d'échelle permet d'établir une relation entre les propriétés d'un modèle à grande échelle et des climats régionaux et locaux à plus petite échelle. On emploie pour cela une méthode dynamique ou statistique ou encore une combinaison de ces deux méthodes. Toutefois, avant de procéder à la réduction d'échelle, il importe d'évaluer l'influence des caractéristiques à grande échelle sur le climat de la région ou du lieu considéré. En effet, la réduction d'échelle ne peut apporter des informations supplémentaires que si les grandes échelles exercent un forçage important sur les échelles plus petites. Par exemple, l'intensité des alizés peut exercer un forçage important sur l'effet orographique auquel est soumise une île tropicale.

La méthode dynamique fait intervenir des MCR, qui normalement se servent de l'information synoptique et à grande échelle d'un MCM pour simuler un climat régional. Les MCR peuvent fournir des données à une résolution pouvant atteindre quelques kilomètres. L'un des principaux problèmes à résoudre consiste à établir une relation entre l'information correspondant aux mailles de la grille à faible résolution du MCM par les limites et les mailles plus fines du MCR. En outre, le paramétrage des conditions de convection et des conditions initiales aux échelles appropriées fait partie des enjeux propres à la modélisation. Ces enjeux nécessitent une validation rigoureuse du MCM et du MCR avant qu'il soit possible d'utiliser les sorties de l'un ou l'autre de ces modèles ou des deux. Étant donné que le MCR est essentiellement tributaire du MCM, le fait que ce dernier offre de bonnes performances est de première importance pour la modélisation à échelle plus fine. La méthode décrite ici est généralement employée pour les études et projets concernant les changements climatiques (par exemple les expériences CORDEX) plutôt que pour la prévision saisonnière opérationnelle, qui nécessite des ressources informatiques colossales et la fourniture de fichiers de couplage émanant du MCM en temps quasi réel pour la prévision saisonnière. Pour les études du changement climatique, il est particulièrement important d'évaluer l'incertitude du modèle en plus de l'incertitude des scénarios. À cet égard, il est recommandé d'utiliser plusieurs MCR, couplés de préférence avec plusieurs MCM (voir la conception des expériences CORDEX).

La réduction d'échelle statistique consiste à mettre en évidence des relations statistiques entre les variables à grande échelle et les variables régionales et locales. Les sorties à grande échelle du MCM utilisées dans le modèle statistique servent à obtenir des climats futurs locaux et régionaux. L'inconvénient majeur de la réduction d'échelle statistique est la nécessité de disposer d'observations historiques appropriées (sur lesquelles fonder les relations statistiques) et d'assumer que les relations statistiques resteront valables pour de futurs régions climatiques (ce que l'on appelle la stationnarité). Il est possible d'employer de nombreuses méthodes, sachant que, de façon générale, plus la méthode est complexe et moins les résultats sont fiables. Des projets de comparaison tels que le projet de réduction d'échelle statistique et dynamique pour l'étude des phénomènes extrêmes dans des régions européennes (STARDEX) et les expériences CORDEX ont été entrepris. Des méthodes linéaires sont couramment utilisées à des fins opérationnelles. Il est indispensable de procéder à la validation d'un modèle statistique. Il faut faire preuve de prudence dans l'interprétation du niveau de performance des modèles représenté par des indices de performance.

Les méthodes hybrides utilisent l'information fournie par un MCM ou un MCR dans un modèle statistique afin d'adapter le signal du modèle aux propriétés du climat régional ou local. Elles sont largement employées pour la prévision saisonnière, car elles permettent de corriger certains biais (en particulier le biais spatial) dus à la modélisation et sont par conséquent une source indéniable d'amélioration potentielle de la qualité des prévisions. Il est indispensable d'avoir

accès à la simulation rétrospective du MCM (pour les statistiques de sorties de modèle) ou à un ensemble de réanalyses (pour la méthode de prévision parfaite) en vue de l'étalonnage de ces modèles. À la différence des méthodes statistiques, les méthodes hybrides devraient permettre de représenter les interactions propres au système climatique grâce aux informations à grande échelle fournies par le MCM. Bien entendu, les observations formulées au sujet des méthodes statistiques s'appliquent aussi à la composante statistique des méthodes hybrides.

Toutes les méthodes sont sujettes aux incertitudes dues aux lacunes des connaissances concernant le système terrestre, aux approximations relatives aux paramètres et à la structure des modèles, au caractère aléatoire et aux activités humaines. Il faut évaluer l'incertitude supplémentaire découlant du processus de réduction d'échelle, même si la validation et la vérification des résultats d'un modèle d'échelle réduite constituent un exercice particulièrement difficile, notamment quand on ne dispose pas d'une base d'observations appropriée. À cet égard, l'emploi de techniques de spatialisation (voir 5.9.3) peut faciliter l'interpolation des observations au sol à la résolution spatiale appropriée et l'obtention d'un jeu de données de référence adéquat aux fins de validation et de vérification.

6.4 EXEMPLES DE PRODUITS ET DE REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DES DONNÉES

Il est possible de présenter les données de différentes façons. Les figures 6.2 à 6.13 ainsi que les autres figures reproduites dans le présent guide fournissent des exemples de représentations graphiques simples mais efficaces.

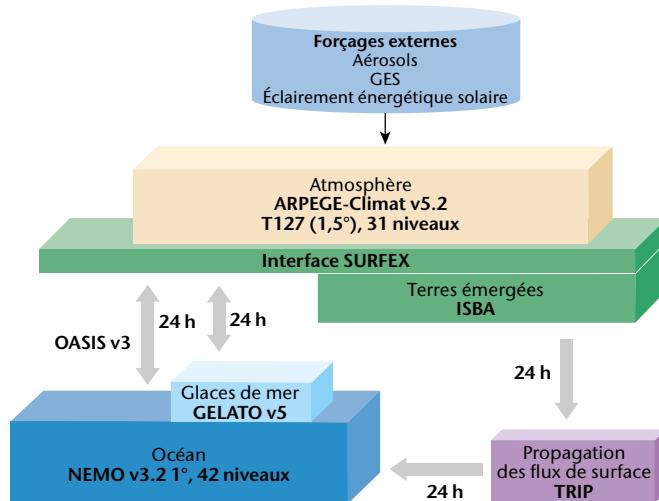


Figure 6.2. Exemple de représentation graphique des composantes d'un modèle destiné à réaliser des simulations du climat pour ce qui est du système terrestre

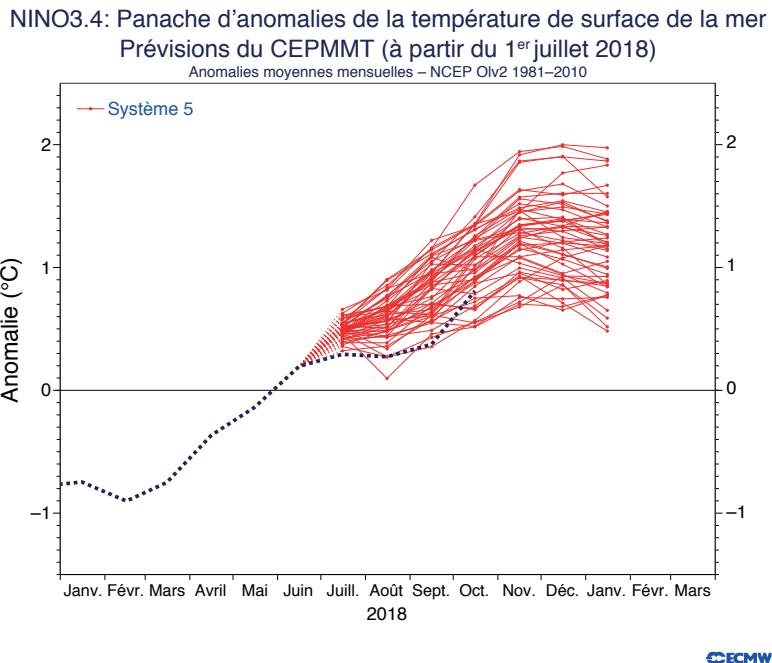


Figure 6.3. Exemple de panache représentant la fourchette de variation d'une prévision saisonnière (par exemple le panache pour une anomalie El Niño)

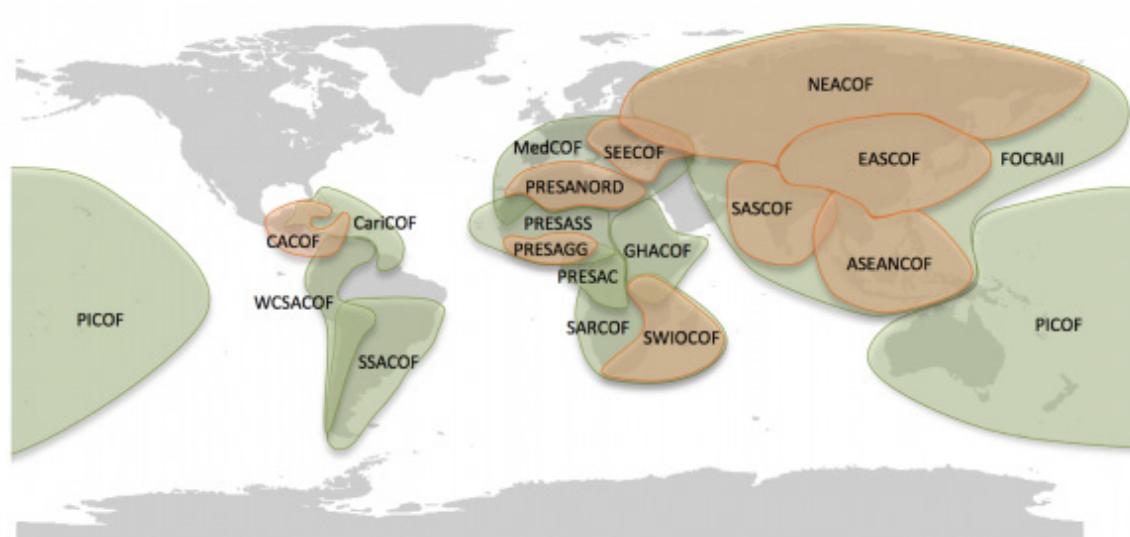


Figure 6.4. Exemple de produits des forums régionaux sur l'évolution probable du climat (prévision consensuelle)

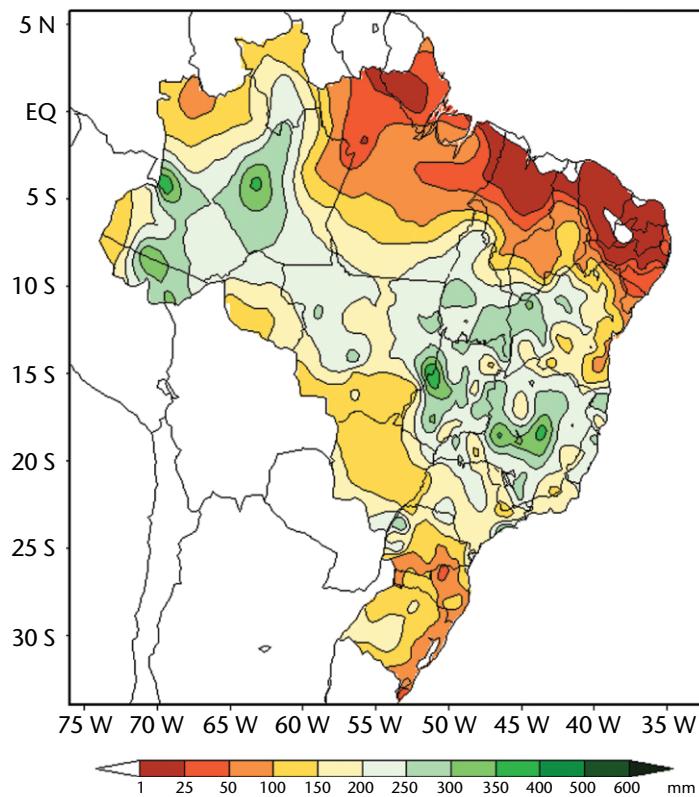


Figure 6.5. Exemple de carte d'isohyètes

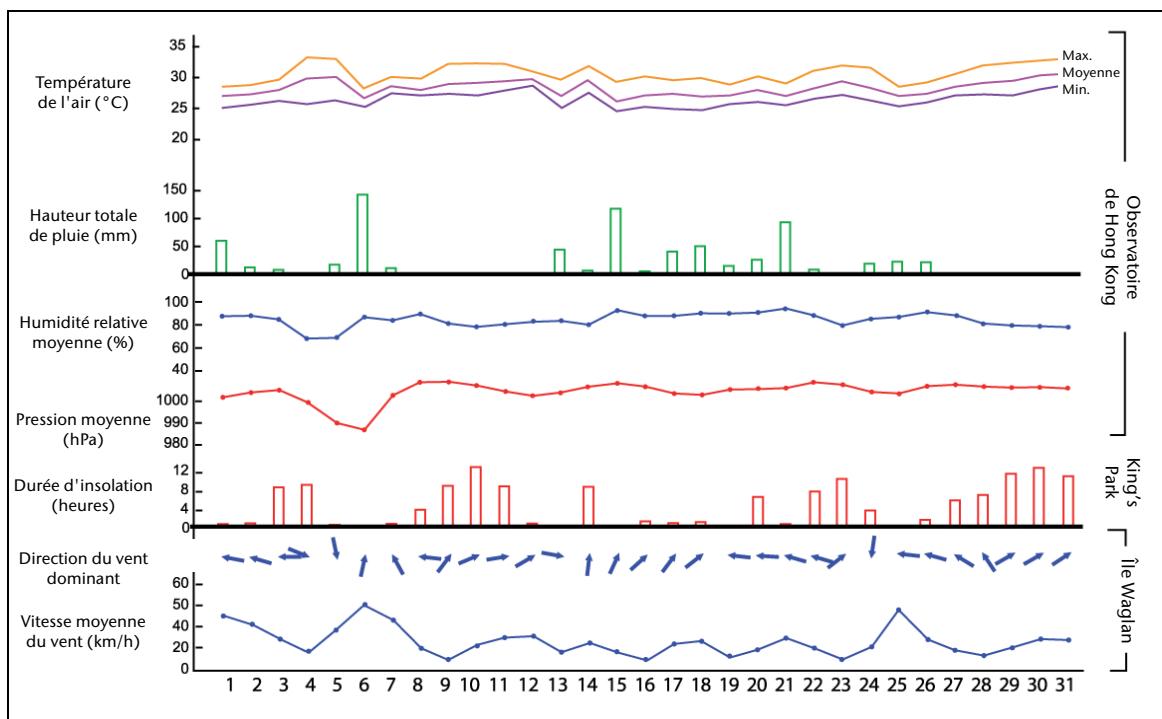


Figure 6.6. Exemple de représentation graphique des valeurs quotidiennes de plusieurs éléments

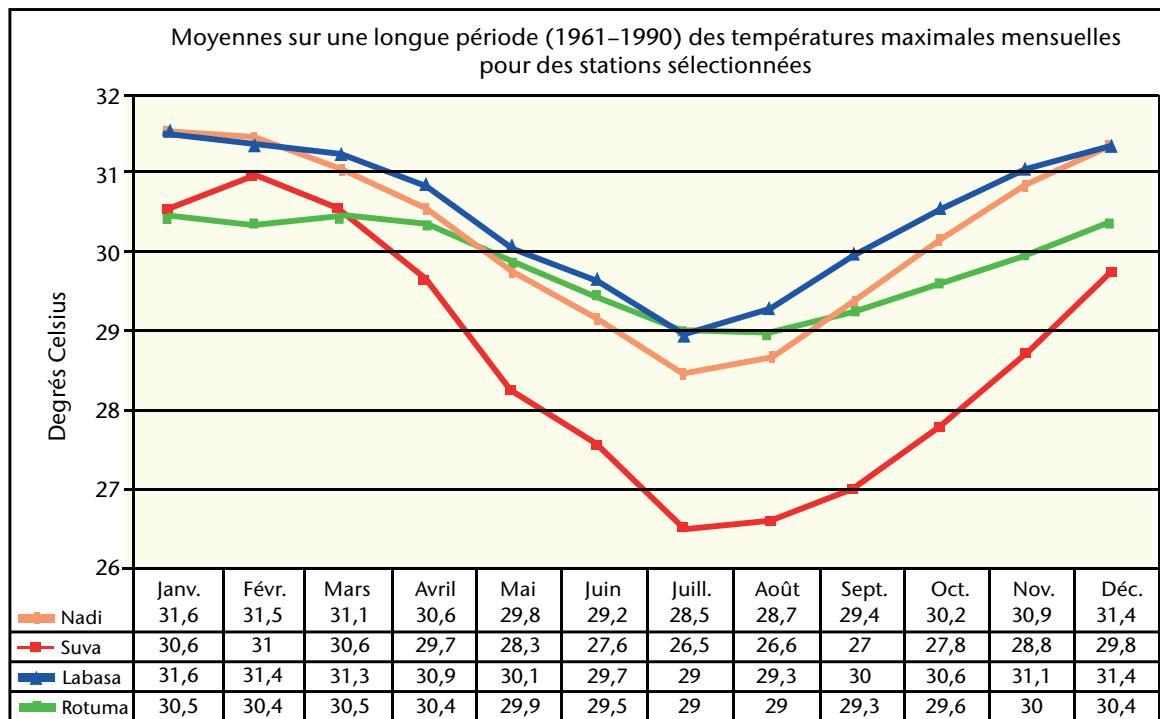


Figure 6.7. Exemple de graphique en courbes et de tableau des températures pour diverses stations

MELVERN LAKE, KANSAS (145210)
Résumé climatologique mensuel
Période des relevés: du 1.5.1973 au 30.4.2000

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
Température maximale moyenne (°F)	37,3	43,4	55,3	65,3	74,1	82,9	89,1	87,9	79,6	68,5	53,6	42,1	64,9
Température minimale moyenne (°F)	16,5	21,3	32,0	42,5	53,0	62,4	67,5	65,0	55,4	44,4	32,5	22,0	42,9
Hauteur totale moyenne des précipitations (pouces)	0,95	1,20	2,58	3,33	5,06	5,24	4,28	3,69	3,81	3,00	2,62	1,41	37,17
Hauteur totale moyenne des chutes de neige (pouces)	2,5	1,8	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	5,5
Épaisseur de neige moyenne (pouces)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Pourcentage par rapport aux observations possibles pour la période

Temp. max.: 95,9 % Temp. min.: 96,2 % Précipitations: 96 % Chute de neige: 89,3 % Épaisseur de neige: 91 %

Figure 6.8. Exemple de représentation d'un résumé climatologique mensuel sous forme de tableau

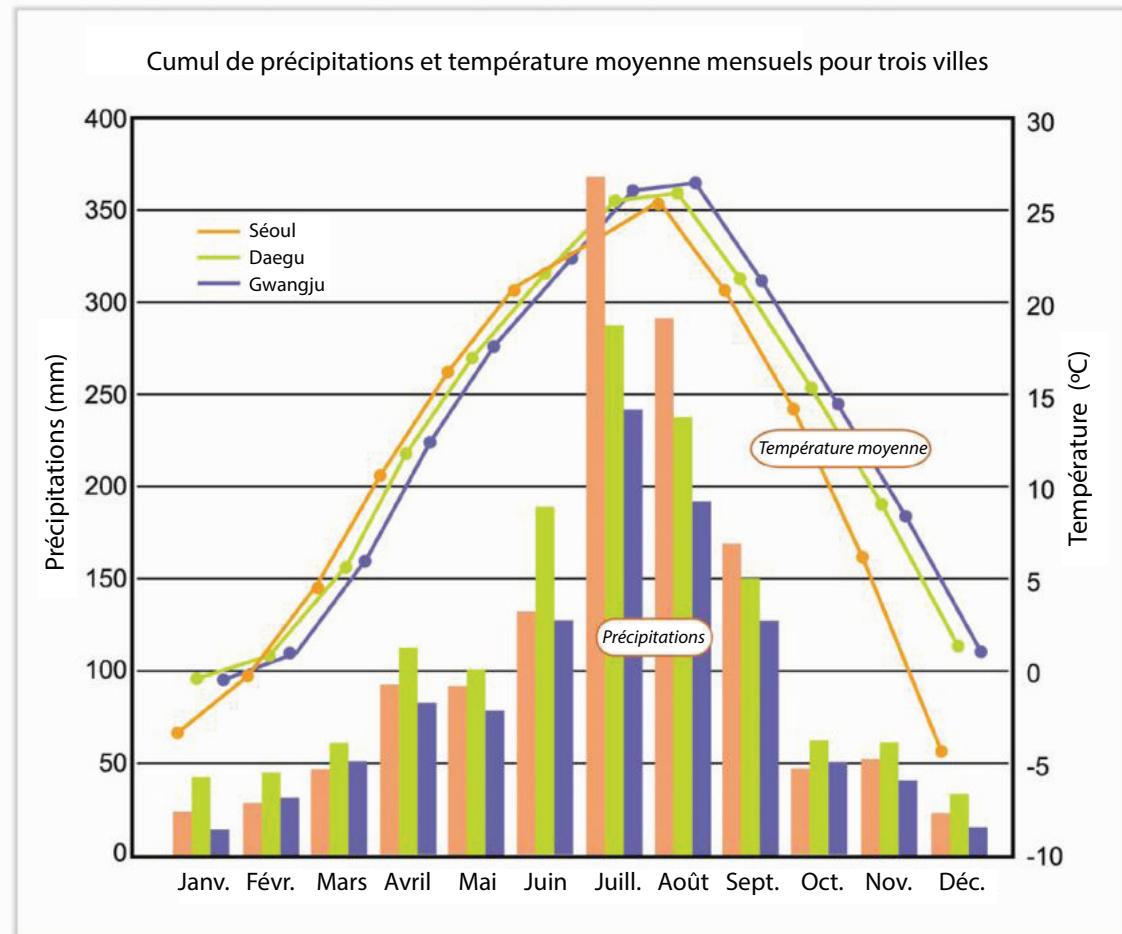


Figure 6.9. Exemple de diagramme combiné (courbes et barres) pour plusieurs éléments et stations

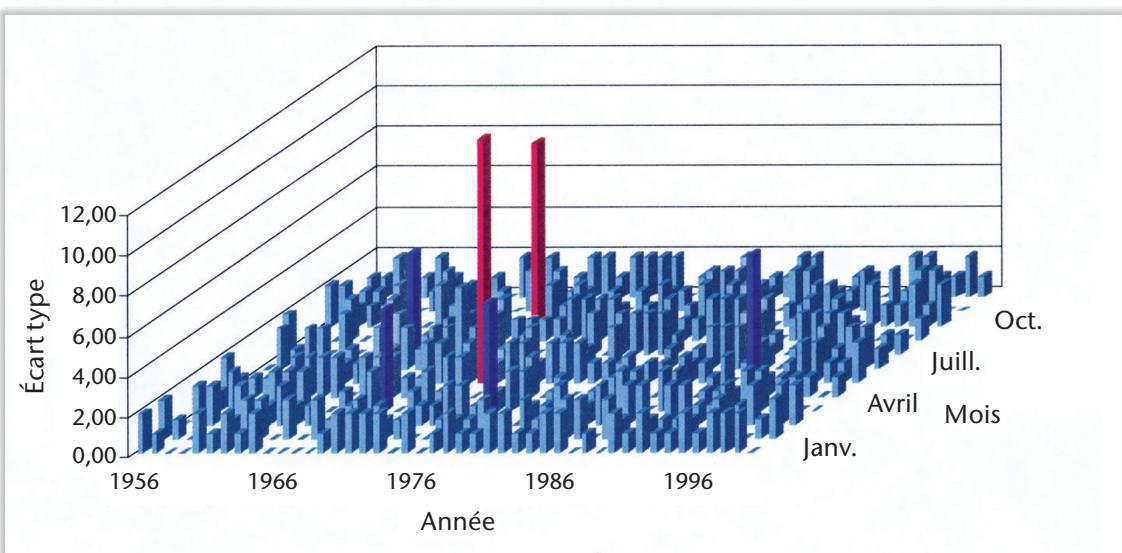


Figure 6.10. Exemple de représentation tridimensionnelle faisant ressortir les valeurs anormales

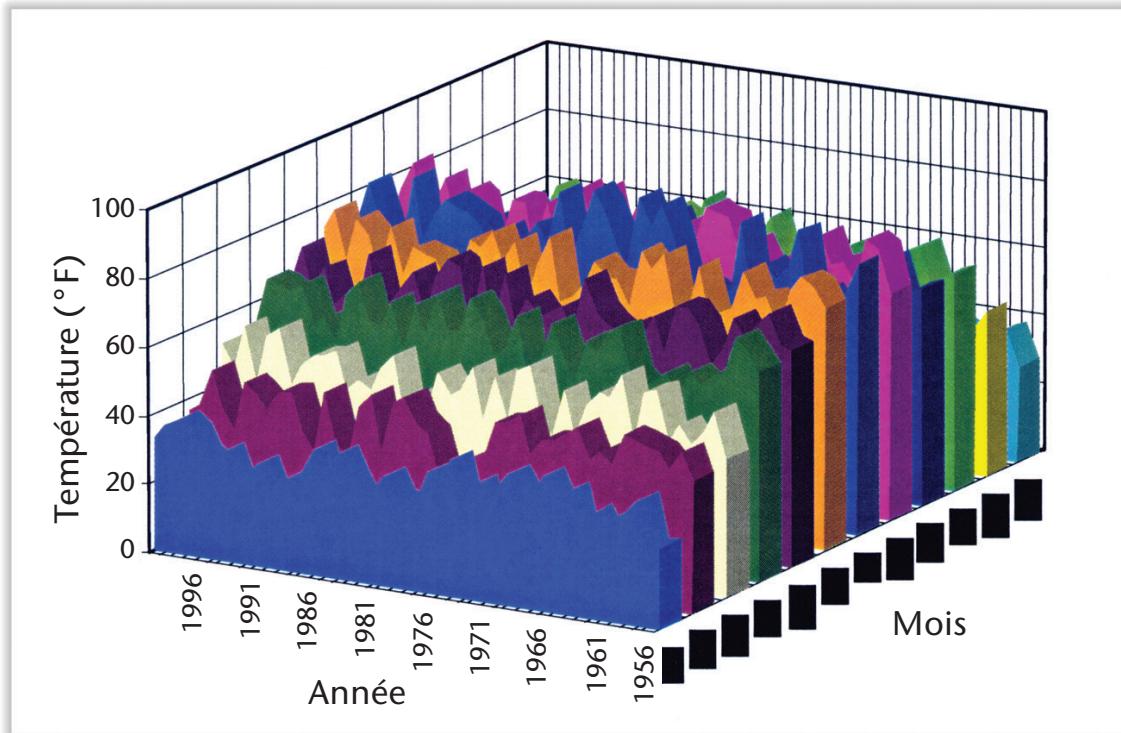


Figure 6.11. Exemple de représentation tridimensionnelle de séries chronologiques de valeurs mensuelles pour une année donnée

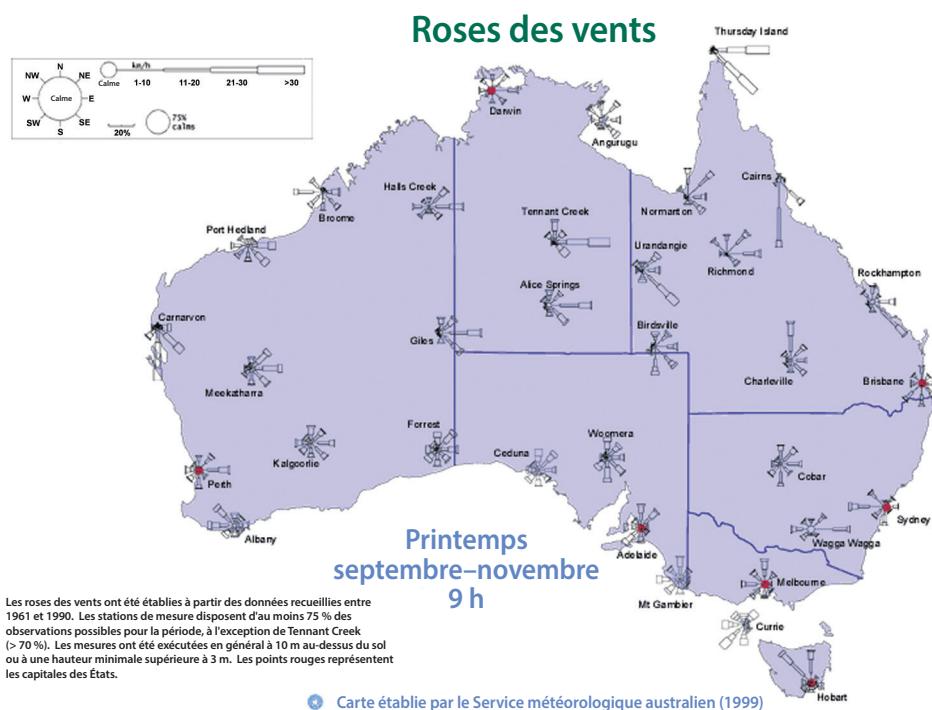


Figure 6.12. Exemple de représentation cartographique symbolique des vents

Suivi de la sécheresse aux États-Unis

2 octobre 2018

Date de publication: jeudi 4 octobre 2018
8 h EDT

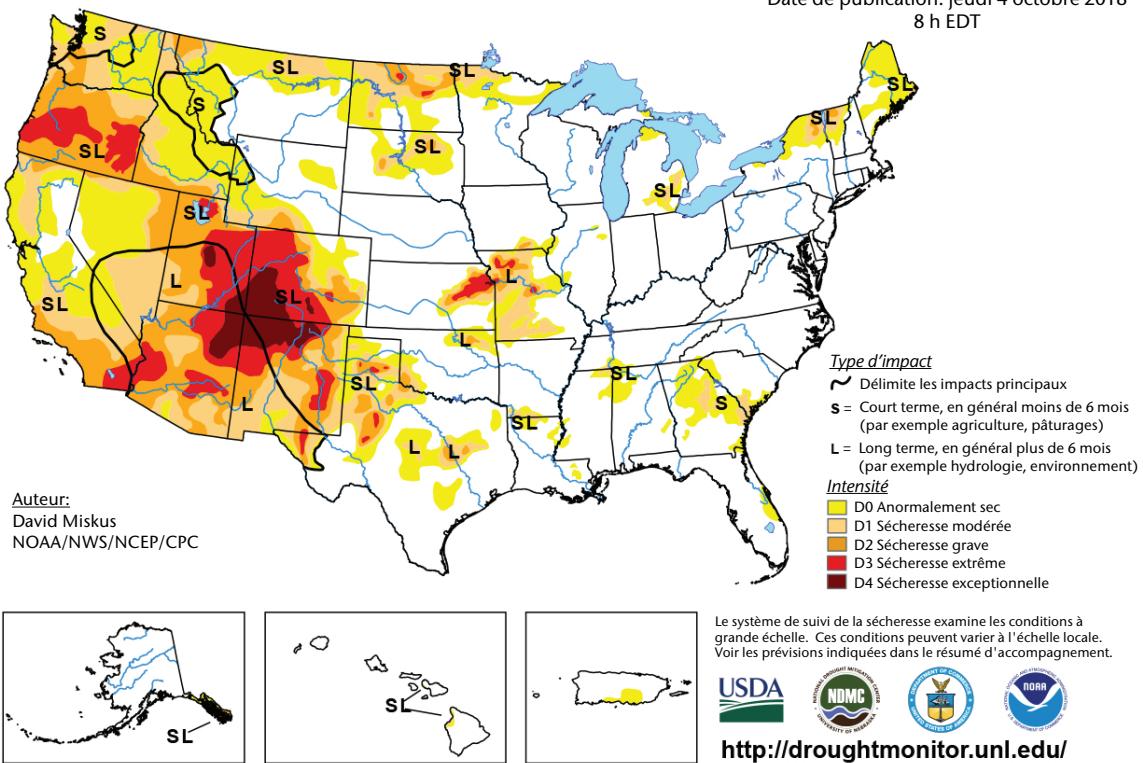


Figure 6.13. Isogramme des catégories de sécheresse et de leurs effets

BIBLIOGRAPHIE

- Dake, C. et al., 2004: Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*, 428 (2004):733–736.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2000: *Rapport spécial du GIEC: Scénarios d'émissions – Résumé à l'intention des décideurs*.
- , 2013: Résumé à l'intention des décideurs. In: *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Extraits de la contribution du Groupe de travail I au Cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [publié sous la direction de T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis d'Amérique, Cambridge University Press.
- , 2013: Glossaire (coordonnateur: S. Planton). In: *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Extraits de la contribution du Groupe de travail I au Cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [publié sous la direction de T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis d'Amérique, Cambridge University Press.
- Hamill, T. M., G. T. Bates, J. S. Whitaker, D. R. Murray, M. Fiorino, T. J. Galarneau (Jr.), Y. Zhu et W. Lapenta, 2013: NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast data set. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 1553–1565.
- Katragkou, E., M. García-Díez, R. Vautard, S. Sobolowski, P. Zanis, G. Alexandri, R. M. Cardoso, A. Colette, J. Fernandez, A. Gobiet, K. Goergen, T. Karacostas, S. Knist, S. Mayer, P.M.M. Soares, I. Pytharoulis, I. Tegoulias, A. Tsikerdekis et D. Jacob, 2015: Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: Evaluation of a WRF multi-physics ensemble. *Geoscientific Model Development*, 8, 603–618, <https://www.geosci-model-dev.net/8/603/2015/>.
- METEOTERM de l'OMM, http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_fr.html.
- Organisation météorologique mondiale, 2009: *Guidelines on Analysis of Extrêmes in a Changing Climate in Support of Informed Décisions for Adaptation* (WMO/TD-No. 1500, WCDMP-No. 72). Genève.
- , 2012: *Principes directeurs relatifs aux systèmes de prévision d'ensemble et à la prévision d'ensemble* (OMM-N° 1091). Genève.
- , 2016: Regional Climate Outlook Forums, https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3191.
- , 2017: *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision* (OMM-N° 485). Genève.

AUTRES LECTURES

- American Meteorological Society, 1993: Guidelines for using color to depict meteorological information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74:1709–1713.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett et P.D. Jones, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*, 111: D12106.
- Dunn, R.J.H., M.G. Donat et L. Alexander, 2014: Investigating uncertainties in global gridded data sets of climate extremes. *Climate of the Past*, 10 (6):2171–2199, doi:10.5194/cp-10-2171-2014.
- Dunn, R.J.H., K.M. Willett, A. Ciavarella et P.A. Stott, 2017: Comparison of land surface humidity between observations and CMIP5 models. *Earth System Dynamics*, 8 (3):719–747, doi:10.5194/esd-8-719-2017.
- Giorgi, F., C. Jones et G. R. Asrar, 2009: L'expérience CORDEX: répondre aux besoins d'information climatologique à l'échelle régionale. *Bulletin de l'OMM*, 58 (3):175–183.
- Giorgi, F. et W.J. Gutowski (Jr.), 2015: Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, Volume 40:467–490, doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217.
- Gonçalves, M., P. Martinho et C. Guedes Soares, 2016: A hindcast study on wave energy variability and trends in Le Croisic, France. In *Progress in Renewable Energies Offshore*. Proceedings of the 2nd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW2016), Lisbonne, Portugal, 24–26 octobre 2016. CRC Press.

- Gutowski, W. J. (Jr.), F. Giorgi, B. Timbal, A. Frigon, D. Jacob, H.-S. Kang, K. Raghavan, B. Lee, C. Lennard, G. Nikulin, E. O'Rourke , M. Rixen, S. Solman, T. Stephenson et F. Tangang, 2016: WCRP COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): A diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 4087–4095.
- Hargreaves, G.H., 1975: Moisture availability and crop production. *Transaction of the ASAE*, 18:980–984.
- Hofstra, N., M. New et C. McSweeney, 2010: The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data. *Climate Dynamics*, 35 (5):841–858, doi:10.1007/s00382-009-0698-1.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014: *The Fifth Assessment Report (AR5)*, <https://ipcc.ch/report/ar5>.
- Jones, P.D., M. New, D.E. Parker, S. Martin et I.G. Rigor, 1999: Surface air temperature and its variations over the last 150 years. *Reviews of Geophysics*, 37:173–199.
- Khambete, N.N., 1992: Agroclimatic classification for assessment of the crop potential of Karnataka. *Mausam*, 43(1):91–98.
- McEvoy, D.J., J.F. Mejia et J.L. Huntington, 2014: Use of an observation network in the Great Basin to evaluate gridded climate data. *Journal of Hydrometeorology*, 15 (5):1913–1931, doi:10.1175/JHM-D-14-0015.1.
- Peterson, T.C., 2005: Les indices de changements climatiques. *Bulletin de l'OMM*, 54 (2):83–86.
- Peterson, T.C. et M.J. Manton, 2008: Monitoring changes in climate extremes: A tale of international cooperation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89:1266–1271.
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi et K.E. Taylor, 2007: Climate models and their evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller, eds.). Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis d'Amérique, Cambridge University Press.
- Rayner, N.A., P. Brohan, D.E. Parker, C.K. Folland, J.J. Kennedy, M. Vanicek, T. Ansell et S.F.B. Tett, 2006: Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset. *Journal of Climate*, 19:446–469.
- Sarker, R.P. et B.C. Biswas, 1988: A new approach to agroclimatic classification to find out crop potential. *Mausam*, 39(4):343–358.
- Stouffer, R. J., V. Eyring, G.A. Meehl, S. Bony, C. Senior, B. Stevens et K.E. Taylor, 2017: CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (1):95–105, doi:10.1175/BAMS-D-15-00013.1.
- Taylor, K.E., R. J. Stouffer et G.A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (4):485–498.
- Tufte, E.R., 1990: *Envisioning Information*. Cheshire, Connecticut, Graphic Press.
- Van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, Kram, T. Kram, V. Krey, J.F. Lamarque et T. Masui, 2011: The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5–31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Von Storch, H. et Navarra, A. (éd.), 2013: *Analysis of climate variability: Applications of statistical techniques*. Compte rendu des travaux d'une université d'automne organisée par la Commission des Communautés européennes, Elbe (Italie), 30 octobre–6 novembre 1993. Springer Science & Business Media.
- Wikipedia, 2017, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Backtesting>.

CHAPITRE 7. PRESTATION DE SERVICES

7.1 INTRODUCTION

Les services climatologiques proposent des informations, des produits ou des activités concernant le climat qui aident des particuliers ou des organismes à prendre des décisions. Un service est défini comme le produit fourni et les activités liées aux personnes, aux processus et aux technologies de l'information nécessaires pour en assurer la fourniture, ou encore comme l'activité menée (conseils, interprétation de l'information climatologique, etc.) pour répondre aux besoins d'un utilisateur ou qui peut être appliquée par un utilisateur (voir la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129), 4.1 et 4.2). En principe, un service devrait être fondé sur une compréhension des besoins de l'utilisateur; il devrait fournir des informations, des produits et des conseils qui soient adaptés à l'utilisateur, que ce soit en matière de calendrier, de présentation ou de contenu, et maintenir un dialogue avec l'utilisateur.

Pour être efficace, un service devrait être:

- Crédible: afin que l'utilisateur l'intègre en toute confiance dans le processus décisionnel;
- Disponible en temps voulu: immédiatement disponible quand et où l'utilisateur en a besoin;
- Sûr et fiable: toujours fourni en temps voulu et selon les spécifications de l'utilisateur;
- Utilisable: présenté sous une forme adaptée à l'utilisateur de sorte que le client puisse en tirer pleinement profit;
- Utile: susceptible de répondre comme il convient aux besoins de l'utilisateur;
- Extensible: applicable à différents types de service;
- Durable: abordable et cohérent sur la durée;
- Adaptable et souple: susceptible de s'adapter à l'évolution des besoins de l'utilisateur;
- Authentique: susceptible d'être pleinement accepté par les parties prenantes dans le cadre d'un processus décisionnel donné.

Ces services nécessitent des données de qualité issues de bases de données nationales et internationales, des cartes, des analyses des risques et de la vulnérabilité, des évaluations ainsi que des projections et des scénarios à long terme. En fonction des besoins des utilisateurs, ces données et produits d'information peuvent être associés à des données non météorologiques concernant par exemple la production agricole, les tendances en matière de santé et la répartition des populations dans les zones à risque, à des cartes routières et d'infrastructures pour le transport de marchandises et à d'autres variables socio-économiques (voir la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129), 4.2). La prestation de services est un processus cyclique et continu, consistant à créer et à fournir des services axés sur les besoins des utilisateurs (voir figure 7.1), que l'on peut subdiviser en quatre étapes:

Étape 1: Recenser les utilisateurs et définir leurs besoins; déterminer le rôle que joue l'information climatologique dans différents secteurs;

Étape 2: Faire participer les utilisateurs, les prestataires, les fournisseurs et les partenaires à la conception et à la mise au point des services et veiller à ce que ces services répondent aux besoins des utilisateurs;

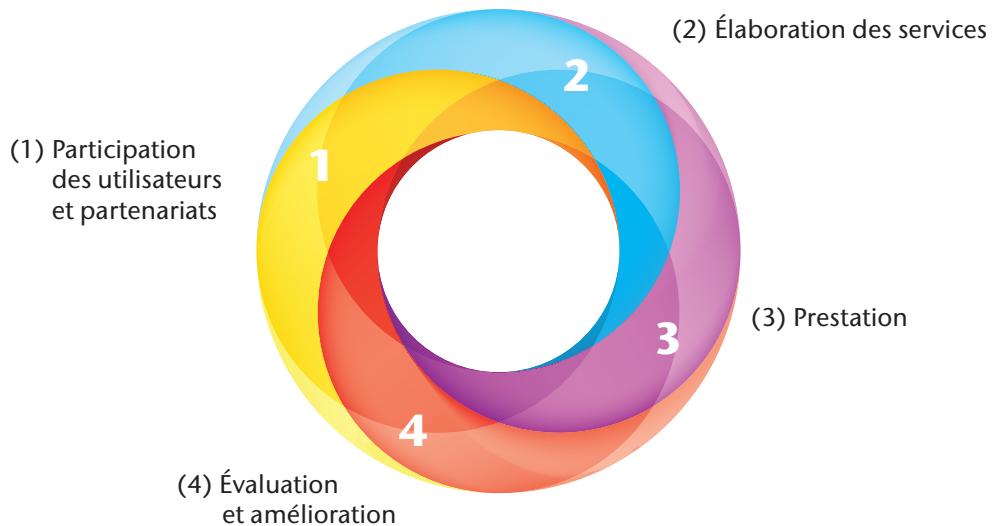


Figure 7.1. Les quatre étapes du cycle continu de mise au point et de prestation de services

Étape 3: Produire et diffuser des données, des produits et des informations (c'est-à-dire des services) qui sont adaptés à l'usage projeté et aux attentes des utilisateurs;

Étape 4: Recueillir les impressions des utilisateurs et élaborer des indicateurs de rendement afin de pouvoir analyser et améliorer constamment les produits et services.

Le Cadre mondial pour les services climatologiques (CMSC) a été créé afin d'offrir une plate-forme crédible, intégrée et unique destinée à guider et à faciliter les activités mises en œuvre dans les secteurs sensibles au climat (voir le Plan de mise en œuvre du Cadre mondial pour les services climatologiques, 1.3). Il a pour objet de permettre à la société de mieux gérer les risques et les perspectives associés à la variabilité et à l'évolution du climat. Le CMSC donne une grande importance à la participation des utilisateurs et au développement des capacités, et l'implication de tous les partenaires dans cet effort concerté a pour but d'optimiser les avantages pour tous les utilisateurs.

7.2 UTILISATEURS ET UTILISATIONS DE L'INFORMATION CLIMATOLOGIQUE

De l'écolier au dirigeant ou décideur sur le plan mondial, les utilisateurs des services climatologiques sont nombreux et divers. Ces services s'adressent à des groupes d'activités très variés : les médias et le domaine de l'information du public, les agriculteurs, les forces armées, les services ministériels, le monde des affaires et de l'industrie, les responsables de l'eau et de l'énergie, les consommateurs, les touristes, les spécialistes du droit, les autorités de la santé, les organisations humanitaires et de secours ou encore les Services météorologiques. Les besoins des utilisateurs varient tout autant : un simple intérêt vis-à-vis du temps et du climat, un projet scolaire, la conception d'un bâtiment, des travaux agricoles, la gestion de l'eau, le fonctionnement d'un système de climatisation ou d'un grand barrage, la planification de la production et de la distribution de l'énergie ou encore la prévention et l'intervention en matière de pénuries alimentaires et d'eau.

Compte tenu de l'intérêt que suscitent actuellement les changements climatiques et leurs répercussions, la demande en information climatologique a augmenté. Auparavant, les produits climatologiques se limitaient surtout à une information portant sur les caractéristiques physiques de l'atmosphère proche de la surface terrestre. Aujourd'hui, les demandes des utilisateurs englobent de nombreux aspects du climat et du système terrestre au sens large (masses continentales, atmosphère, océans, biosphère et surface terrestre, et cryosphère). Les données ayant trait au climat servent à présent à décrire, caractériser et prévoir à la fois le comportement du système climatique dans son ensemble (y compris les incidences des activités humaines sur

le climat) et les relations entre le climat et d'autres éléments du monde naturel et de la société humaine. Il en résulte un besoin accru de surveiller et de décrire le climat en détail, à la fois dans l'espace et dans le temps, tout en situant les phénomènes actuels dans leur contexte historique. Ainsi établit-on des jeux de données climatologiques de grande qualité pour servir de référence, ce pour quoi des techniques statistiques complexes d'assurance de la qualité ont été mises au point. Pour compiler de tels jeux de données, on fait appel à des procédures visant à déceler les valeurs aberrantes, et à les corriger dans la mesure du possible, et à prendre en compte les ruptures d'homogénéité que peuvent causer les remplacements d'instruments ou le changement d'emplacement des stations d'observation. Les chercheurs et d'autres spécialistes qui utilisent les produits climatologiques portent aussi un vif intérêt aux métadonnées, qui aident à interpréter et à analyser l'homogénéité et la qualité des données.

Il est possible de classer les utilisations de l'information climatologique sous deux grandes catégories, en distinguant utilisation stratégique et utilisation tactique. Les utilisations stratégiques regroupent les produits qui contribuent à la planification générale à long terme et à la conception de projets et de politiques. L'adaptation à l'évolution du climat devient une composante courante et nécessaire de la planification à tous les niveaux. Dans ce contexte, les Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) sont des acteurs majeurs de la planification du développement national dans pratiquement tous les secteurs (voir la publication intitulée *Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation* (WMO-No. 1170)). Pour des utilisations stratégiques, on se sert habituellement d'analyses probabilistes et d'évaluations de risques concernant l'occurrence de phénomènes météorologiques en vue de l'établissement de critères et de règles de conception, de résumés des conditions climatiques passées en tant qu'information historique et de scénarios climatiques en tant qu'indicateurs des conditions auxquelles ont peut s'attendre à l'avenir. Réaliser une étude des données climatologiques pour concevoir un barrage constitue un exemple d'utilisation stratégique. Les utilisations tactiques regroupent les produits et les données qui contribuent à la résolution de problèmes singuliers, immédiats ou à court terme. À cet effet, on se sert normalement de copies d'observations officielles portant sur l'occurrence d'un phénomène météorologique en particulier, de résumés de données historiques ou de la description d'un phénomène dans un contexte historique. L'analyse de données d'observation récentes visant à faciliter la maîtrise de l'usage de l'eau au cours d'une sécheresse est un exemple d'utilisation tactique. Parfois, les utilisations sont à la fois stratégiques et tactiques. Par exemple, un même calcul de probabilités portant sur la vitesse et la direction du déplacement de tempêtes tropicales à partir de données historiques sert aussi bien à des fins stratégiques qu'à des fins tactiques, notamment quand il sert à prévoir le déplacement d'une tempête en cours.

Voici une liste non exhaustive des modes d'utilisation de l'information climatologique:

- Suivi d'activités induites par les conditions météorologiques (exemples: consommation de carburant pour le chauffage ou la climatisation, dépassement de seuils établis relatifs aux concentrations de polluants atmosphériques, variabilité des ventes de marchandises, inflation sur les marchés des produits de base en cas de sécheresse);
- Prévision du comportement de systèmes sectoriels en réaction à des phénomènes météorologiques, compte tenu de la connaissance des temps de réaction et des incidences de phénomènes météorologiques et climatiques observés dans un passé récent (exemples: production et consommation d'énergie, anticipation pour la reconstitution des stocks, production agricole, maladies des cultures, systèmes d'alerte de vagues de chaleur dans le cadre d'une veille sanitaire, sécurité alimentaire, approvisionnement et demande en eau);
- Attestation de l'occurrence de phénomènes météorologiques, comme les orages, les vents violents, le gel ou la sécheresse, dans le domaine de l'assurance et à d'autres fins;
- Surveillance destinée à établir les caractéristiques d'un phénomène ou d'une période en particulier, notamment des écarts par rapport aux conditions normales (exemples: intensité d'épisodes de pluie ou de sécheresse extrême);

- Conception d'équipements exigeant la connaissance du climat local pour en garantir l'efficacité et la viabilité (exemples: ouvrages de génie civil, systèmes de climatisation, réseaux d'irrigation et de drainage);
- Étude d'impact, permettant par exemple de mieux connaître les conditions initiales pour pouvoir évaluer les incidences sur la qualité d'air de l'installation d'une centrale électrique ou d'une usine;
- Étude de l'influence des conditions météorologiques sur les secteurs économiques, notamment les transports publics et le tourisme;
- Planification et gestion des risques pour la mise en place de services publics (exemples: eau, énergie) et préparation aux situations d'urgence et organisation des secours;
- Appui des mesures d'adaptation aux changements climatiques.

Pour promouvoir l'usage des services climatologiques, il est important que les utilisateurs participent activement à l'ensemble du processus d'élaboration et de prestation de ces services (voir la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129)). Cette participation permettra de mieux connaître les besoins des utilisateurs. Elle permet également d'apprécier l'incidence des services climatologiques sur la protection des personnes et des biens, la préservation de l'environnement et la promotion du développement économique et de la prospérité. Grâce à cette connaissance partagée, il est ainsi possible de proposer des produits et des services plus utiles, qui correspondent davantage aux demandes de l'extérieur et qui sont mieux adaptés à l'usage projeté.

Une prestation efficace des services relatifs au climat repose sur les principes suivants:

- La participation des utilisateurs devrait débuter à un stade précoce de la mise au point des produits et services;
- Il est indispensable de connaître l'opinion des clients tout au long du processus pour pouvoir concevoir et fournir des services efficaces;
- Le partage des meilleures pratiques entre prestataires et utilisateurs favorise une conception et une mise en œuvre efficaces et efficientes des services;
- Il est indispensable de créer des partenariats avec d'autres organismes internationaux et régionaux également investis dans la prestation de services pour optimiser l'utilisation de l'information climatologique dans le processus décisionnel. La figure 7.2 indique les principes à observer pour instaurer une culture davantage axée sur les services.

7.3 INTERACTION AVEC LES UTILISATEURS

L'enseignement et la communication peuvent tenir une place importante dans la prestation de services climatologiques. Parmi les utilisateurs éventuels de l'information climatologique, nombreux sont ceux dont la connaissance de la science météorologique et des notions connexes est relativement restreinte et qui peuvent par conséquent ne pas savoir de quelle information ils ont réellement besoin ou quelle est la meilleure façon de l'utiliser. En outre, beaucoup d'utilisateurs ne savent pas toujours comment intégrer l'information climatologique dans leurs propres processus décisionnels. Il arrive souvent qu'ils demandent des produits simplement parce qu'ils savent qu'ils existent. Il incombe aux SMHN d'élaborer des méthodes et des outils plus détaillés en partenariat avec les utilisateurs. Cela devrait permettre de faire participer plus activement ces derniers au processus de prestation de services (voir la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129), chapitres 3 et 4).



Figure 7.2. Les six principes à observer pour instaurer une culture davantage axée sur les services

Même la meilleure information, diffusée en temps voulu, aura peu d'effet si elle ne suscite pas la bonne réaction de la part des utilisateurs. L'utilité de l'information sur le climat découle en grande partie de sa communication aux utilisateurs et de leurs réactions. En définitive, son utilité se mesure à son incidence sociale et économique. Si l'information disponible n'est pas pleinement exploitée, il est possible de la valoriser en améliorant la communication entre prestataires et utilisateurs. Une bonne prestation de services consiste donc à fournir aux utilisateurs et aux clients des produits et des services qui leur sont utiles. Les SMHN ne doivent pas évaluer seuls les besoins à satisfaire, mais plutôt en concertation avec les utilisateurs, les prestataires et les partenaires. Le prestataire et l'utilisateur de ces services doivent prendre mutuellement conscience des délais prévus pour la production des services et le processus décisionnel. L'adaptation des services à l'usage projeté nécessite un accord implicite ou explicite de toutes les parties prenantes, qui tienne compte de l'ensemble ou d'une partie des éléments suivants (voir la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129), 4.1):

- Les besoins actuels et futurs des utilisateurs;
- Les capacités des prestataires, y compris leurs points forts et leurs points faibles;
- La nature des services à fournir et la façon dont ils seront fournis;
- La manière dont les services seront utilisés;
- Les attentes quant aux résultats et à l'efficacité de la prestation;
- Les coûts ou le travail jugés acceptables;
- Les risques inhérents à l'intégration de l'information dans le processus décisionnel.

Un Service climatologique devrait s'assurer qu'il dispose des compétences voulues dans le domaine de la communication, de l'interprétation et de l'utilisation de l'information

climatologique. C'est au personnel du Service climatologique qu'il appartient d'aider les utilisateurs de l'information, qui n'ont pas toujours les compétences techniques requises, à appréhender les particularités techniques des données, analyses, prévisions et scénarios relatifs au climat. C'est aussi à lui qu'il incombe de répondre aux demandes de données et de renseignements supplémentaires au sujet notamment des stations et des instruments d'observation, des éléments observés, des définitions mathématiques de divers paramètres, de la façon dont les observations sont réalisées et de la météorologie et de la climatologie en général. Les mécanismes d'appui aux utilisateurs devraient être officialisés et portés à la connaissance de ces derniers. Le personnel d'un Service climatologique devrait développer un large éventail d'aptitudes et de compétences ou avoir accès à des personnes possédant les compétences nécessaires.

Il arrive que des utilisateurs organisent des réunions ou d'autres activités auxquelles le personnel du Service climatologique est convié. Le fait de donner une réponse positive à ce type d'invitation tend à renforcer les relations et offre au personnel du Service climatologique l'occasion de s'informer au sujet des utilisateurs et de leurs problèmes. Outre le fait que cela soit très valorisant, il importe de prendre part aux activités des utilisateurs dans toute la mesure du possible. En effet, les remarques qu'on peut recueillir auprès de ceux-ci permettent en général d'améliorer les produits, de créer de nouvelles applications et de rendre la diffusion de l'information climatologique plus efficace pour n'oublier personne. Il est essentiel d'entretenir une communication permanente ou fréquente avec les utilisateurs pour veiller à ce que les produits existants continuent de répondre à leurs besoins et pour pouvoir déterminer les modifications qu'il convient d'apporter aux produits afin de continuer à satisfaire les utilisateurs.

Les membres du personnel des services à la clientèle doivent être courtois, avoir du tact et être conscients de l'importance du respect des délais (les besoins des utilisateurs peuvent revêtir un caractère d'urgence pour de nombreuses raisons). La communication devrait idéalement faire partie des atouts d'un Service climatologique, qui doit disposer des moyens techniques et de formation dont a besoin le personnel des services à la clientèle. Les membres du personnel chargés de fournir les services à la clientèle sont les personnes avec lesquelles le public interagit directement et sur lesquelles repose la réputation du prestataire de services.

Le public devrait pouvoir trouver aisément à qui s'adresser selon le mode de communication qu'il envisage d'utiliser, ainsi que des renseignements sur les services disponibles, notamment les heures de fonctionnement ou encore les délais pour obtenir une réponse. Il importe de pouvoir diffuser l'information à l'aide de différentes méthodes. Le prestataire de services peut disposer d'un système moderne et puissant dont il peut se servir notamment à cette fin, mais pour beaucoup d'utilisateurs, ce n'est pas le cas. Les techniques modernes de communication permettent à présent de communiquer et de diffuser très rapidement les données et les produits via l'Internet, mais d'autres méthodes de diffusion peuvent se révéler nécessaires dans certains pays et certaines conditions. Cela contribuera à assurer la viabilité à long terme du service fourni.

Un SMHN étant souvent composé de plusieurs services, il se peut que des incohérences apparaissent entre eux pour ce qui concerne les normes appliquées, les formats utilisés ou même les produits diffusés. Il est indispensable que ces services communiquent fréquemment entre eux; il est conseillé d'organiser régulièrement, et au moins une fois par an, des réunions au cours desquelles le personnel est présent physiquement. Il est utile aussi, pour veiller à la cohérence entre services, de mettre en place des procédures opérationnelles centralisées et applicables par tous ainsi qu'une seule base de données de référence, mais aussi de veiller à disposer d'une documentation, de normes de qualité, de directives et de manuels bien rédigés.

Lorsque la prestation de services est facturée aux utilisateurs, le prix à payer, si ceux-ci jugent qu'il est trop élevé ou qu'il n'est pas appliqué avec cohérence, peut devenir un sujet particulièrement sensible ainsi qu'une cause d'insatisfaction et de critique. Il importe donc de mettre en place une politique de tarification claire et transparente et de communiquer des instructions explicites quant à son application. Il peut s'agir par exemple d'une politique officielle s'appuyant sur une série de principes et une liste de tarifs applicables directement par ceux qui fournissent les services sur le plan opérationnel. La politique en question devrait être mise à la disposition de quiconque prend part à la prestation de services, mais aussi de tous les utilisateurs.

La prestation de services ne prend pas fin au moment où le produit ou le service est fourni. La communication et la collaboration doivent se poursuivre, afin que l'on puisse s'assurer que l'utilisateur a bien disposé des services et qu'il a pu les exploiter au mieux. Les SMHN devraient évaluer le processus de bout en bout et les résultats obtenus. Cette évaluation devrait permettre de mettre en lumière les forces de l'organisme et les points à améliorer sur le plan de l'efficacité, de l'efficiency, de l'impact, du degré de satisfaction et de l'utilité de son action pour les parties intéressées, les clients, les utilisateurs, les partenaires et les membres du personnel. Plus particulièrement, ces évaluations devraient être (voir la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129), 4.3):

- Spécifiques: ciblées précisément sur l'aspect à évaluer;
- Quantifiables: susceptibles de recueillir des données exactes et complètes;
- Concrètement applicables: faciles à comprendre et à interpréter afin d'y donner suite;
- Pertinentes: susceptibles de mesurer seulement les éléments qui sont importants et utiles pour atteindre les buts et objectifs d'un organisme. Une erreur courante consiste à tout mesurer, ce qui prend beaucoup de temps et produit des résultats impossibles à exploiter;
- Ponctuelles: exécutées sans retard;
- Fixées d'un commun accord: le fait de s'entendre sur des niveaux de performance acceptables fait partie de l'évaluation des besoins des utilisateurs ou de l'adaptation à l'usage projeté;
- Assignées: les responsables des évaluations devraient être clairement désignés. De préférence, il devrait s'agir de personnes qui ont la capacité, l'autorité et les ressources requises pour agir en vue d'atteindre les objectifs fixés;
- Cohérentes: les méthodes d'évaluation ne devraient pas induire des comportements contradictoires.

Les enquêtes sont l'un des moyens de mesurer le degré de satisfaction des clients. Elles peuvent s'effectuer d'une manière plus ou moins formelle, étendue et normalisée, allant de fréquentes rencontres avec les clients ou d'ateliers à l'intention des utilisateurs à de vastes campagnes de collecte d'information au moyen de sondages standard réalisés par courriel, Internet ou téléphone. Tant les méthodes formelles que les méthodes plus souples sont indiquées et utiles pour connaître l'avis des clients. Les enquêtes peuvent être organisées à intervalles réguliers ou à la suite de la prestation d'un service. Le degré de satisfaction dont il est fait mention lors d'entretiens peut se révéler important pour mesurer l'écart entre la perception des clients et l'évaluation technique de la performance.

Les relations avec les utilisateurs devraient s'inscrire dans un cadre de gestion de la qualité mis en place par la direction d'un Service climatologique en fonction des besoins de sa clientèle (voir la publication intitulée *Guidelines on Quality Management in Climate Services* (WMO-No.°1221), 2.2.1, tableau 2, et chapitre 6).

7.4

INFORMATION ET DIFFUSION DES PRODUITS ET DES SERVICES

Il est indispensable que les utilisateurs soient au centre des préoccupations des prestataires de services climatologiques. Comme les besoins des utilisateurs évoluent, les capacités des prestataires de services devraient aussi s'y adapter au fil du temps. Les méthodes de diffusion des produits et des services sont susceptibles d'évoluer, surtout de nos jours à l'ère des technologies de l'information, et il importe donc que les Membres soient vigilants et en mesure de réagir à cette évolution (voir la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129), 4.1 et 4.4).

La collaboration entre utilisateurs et prestataires se noue à de multiples niveaux et va d'une collaboration relativement passive par l'intermédiaire des sites Web et des outils Internet à une collaboration beaucoup plus active et à des relations ciblées. Fondée sur les besoins des utilisateurs, cette collaboration peut consister simplement en la communication d'informations, mais peut aussi prendre la forme d'une transmission sélective reposant sur le dialogue ou d'une prestation de services spécialement adaptée et ciblée. Ces catégories marquent le passage d'un mode de transmission relativement passif à un mode actif et peuvent augmenter le temps et les ressources financières consacrés à la prestation d'un service et à son utilisation effective.

La qualité de l'interprétation, par un utilisateur, d'un service fourni est en grande partie fonction de la façon dont l'information est présentée et communiquée. Dans la mesure du possible, les faits saillants devraient être présentés sous une forme graphique et s'accompagner d'un texte explicatif destiné à les mettre en exergue. La présentation devrait être logique, claire, concise et adaptée à l'utilisateur visé et au but recherché. Par exemple, le style utilisé pour communiquer une information climatologique à un chercheur sera différent de celui d'un article destiné à paraître dans un journal ou un magazine de vulgarisation.

La démarche adoptée pour résumer les données qui composent un bulletin climatologique périodique destiné à un large éventail d'utilisateurs disposant ou non d'une formation technique doit être différente de celle utilisée pour préparer un rapport d'interprétation consacré à un problème précis de climatologie appliquée. L'information technique destinée à des utilisateurs ne possédant que des connaissances restreintes dans le domaine des sciences atmosphériques doit être présentée de manière simple et explicite, tout en demeurant scientifiquement exacte. Il est judicieux d'éviter les termes scientifiques et les abréviations spécifiques, à moins qu'ils ne soient parfaitement définis.

Si les utilisateurs possédant davantage de connaissances seront mieux en mesure de comprendre une information et des modes de présentation complexes, une certaine préparation de l'information technique ou scientifique demeure néanmoins généralement souhaitable. Un Service climatologique doit par conséquent être en mesure d'anticiper, d'étudier et de comprendre les besoins des pouvoirs publics, des intérêts industriels et commerciaux et du grand public. Il lui faudra donc veiller à ce que le prestataire de services climatologiques possède les connaissances et les compétences professionnelles voulues pour être à même de comprendre les sujets évoqués et de répondre aux questions qui lui seront posées ainsi qu'aux besoins des utilisateurs.

Le Cadre mondial pour les services climatologiques a été établi pour fournir une plate-forme fiable, intégrée et unique destinée à guider et à faciliter les activités mises en œuvre dans les secteurs d'investissement sensibles au climat, dont l'agriculture, l'énergie, la réduction des risques de catastrophe et les secteurs de la santé et de l'eau, à l'appui de l'adaptation aux changements climatiques et de l'atténuation de leurs effets. Il comprend cinq composantes ou volets, dont deux intéressent directement la diffusion des services:

- La plate-forme d'interface utilisateur: un dispositif structuré favorisant l'interaction à tous les niveaux des utilisateurs, des chercheurs en climatologie et des fournisseurs d'information climatologique;
- Le Système d'information sur les services climatologiques: un mécanisme permettant de recueillir, de stocker et de traiter régulièrement l'information sur le climat (passé, présent et futur) et d'obtenir ainsi des produits et des services susceptibles de faciliter la prise de décisions souvent complexes dans toute une série d'activités et d'entreprises sensibles au climat.

La Plate-forme d'interface utilisateur a pour objet de favoriser une prise de décisions efficace eu égard aux considérations relatives au climat, en faisant en sorte que les bonnes informations soient communiquées en temps opportun et en nombre suffisant et qu'elles soient convenablement comprises et utilisées. Elle fait appel à un large éventail de méthodes destinées à faciliter la compréhension mutuelle, notamment par l'intermédiaire de comités officiellement établis, de groupes de travail, de programmes de stage, d'entretiens personnels, d'ateliers, de conférences et d'équipes spéciales interinstitutions. L'éventail est également

large en matière d'actions de communication, de sensibilisation et de formation, qui peuvent prendre la forme d'émissions radiophoniques, de médias sociaux et de messages d'intérêt public et s'appuyer sur des technologies telles que les interfaces cartographiques, les portails et les serveurs d'information. Dans de nombreux cas, ces activités peuvent s'appuyer sur des espaces d'échanges déjà bien établis ou en plein essor, comme les forums régionaux sur l'évolution probable du climat, les groupes de travail sur la liaison avec le public au sein de la communauté chargée de la gestion des catastrophes et les groupes de travail nationaux sur la santé. Le renforcement proposé des relations entre utilisateurs et prestataires vise à rapprocher l'offre d'informations climatologiques fiables et les besoins des utilisateurs en la matière à l'appui de leur processus de décision. Cette compréhension mutuelle peut alors aboutir à la mise en place d'un service climatologique de bout en bout permettant l'élaboration de produits adaptés. Les Membres de l'OMM dotés d'un système de gestion de la qualité en bonne et due forme sont plus susceptibles de s'employer à répondre aux besoins des utilisateurs et de considérer la gestion de la qualité comme un aspect crucial de la prestation de services.

Le Système d'information sur les services climatologiques constitue le moyen permettant de traduire les résultats des recherches et les évolutions technologiques en informations climatologiques opérationnelles améliorées. Il comprend une infrastructure physique regroupant institutions, capacités et outils informatiques et pratiques opérationnelles. Conjugué à des ressources humaines professionnelles, il permet d'élaborer, de produire et de diffuser une vaste gamme de produits et de services climatologiques utilisables à l'échelle mondiale, régionale et nationale.

7.5

COMMERCIALISATION DES SERVICES ET DES PRODUITS

La communication joue un rôle essentiel dans la diffusion du message positif au sujet de l'intérêt que présentent les services climatologiques. Elle fait prendre conscience de la nécessité et des avantages de ces services et aide particuliers et organismes à prendre des décisions qui tiennent compte du climat. Une stratégie globale de communication à l'appui de la prestation de services climatologiques devrait par conséquent définir une série d'objectifs et déterminer la façon de les atteindre à l'aide d'un large éventail de méthodes et de moyens de communication.

La communication est un aspect important de la commercialisation et ne se résume pas simplement à la publicité et à la vente de services climatologiques. Elle permet aussi aux utilisateurs éventuels de savoir quels sont les services et les produits mis à leur disposition, de prendre conscience de l'utilité de ces services et produits et de mieux saisir l'intérêt que présente l'information climatologique, comme il est indiqué dans la publication intitulée *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129), 4.3). Le succès de la plupart des services climatologiques repose essentiellement sur les activités de commercialisation, de relations publiques et de publicité ainsi que de promotion et de diffusion de l'information climatologique. Il est peu probable que l'information climatologique soit suffisante en soi, et il faut souvent la compléter par d'autres informations pour lui conférer une utilité sur le plan social et politique. Les avantages liés à l'utilisation d'un produit doivent faire l'objet d'une campagne de promotion. Il est fréquent en effet que l'intérêt que présente l'information climatologique n'apparaisse pas clairement à ceux qui sont en mesure de tirer profit des produits proposés ou qui décident du financement des programmes climatologiques. Il faut donc clairement démontrer qu'il est avantageux et utile d'utiliser les produits en question d'un point de vue social et économique. Des études s'imposent pour évaluer l'utilité des services climatologiques et ne devraient pas relever de la seule responsabilité des climatologues mais plutôt de la responsabilité commune de toutes les parties prenantes. L'un des moyens de démontrer l'efficacité des services climatologiques consiste à convaincre les utilisateurs de leur utilité.

Un programme de commercialisation et de communication efficace doit notamment s'attacher à:

- Définir les besoins des utilisateurs en cherchant à comprendre clairement quelles sont leurs exigences et quel usage ils font de l'information climatologique;

- Renforcer les capacités des prestataires de services climatologiques et des utilisateurs;
- Cibler le marché;
- Promouvoir les avantages que les services et les produits climatologiques représentent pour les utilisateurs;
- Mettre au point un produit ou un service pour répondre au besoin de l'utilisateur et faire valoir auprès de ce dernier que l'utilisation de ce produit ou service l'aidera à résoudre ses problèmes;
- Mettre en valeur les compétences professionnelles du personnel du Service climatologique;
- Déterminer les modes d'accès ou de diffusion pour un produit donné et communiquer des solutions de remplacement à l'utilisateur;
- Évaluer les aspects économiques des produits et des services;
- Tenir les utilisateurs informés par des activités de promotion et de relations publiques;
- Contrôler le degré de satisfaction des utilisateurs et évaluer l'efficacité des prestations et des activités de commercialisation;
- Veiller à la crédibilité et à la viabilité à long terme des services climatologiques en indiquant clairement la fiabilité et les points faibles des produits et services proposés.

Le renforcement des capacités concernant tous les aspects de la prestation de services devrait être intégré dans les activités de formation pertinentes. Ces activités devraient aussi englober des renseignements sur les utilisateurs de l'information climatologique, sur leurs processus décisionnels et sur la façon dont ils appliquent l'information climatologique à leur prise de décisions (voir l'*Annexe du Plan de mise en œuvre du Cadre mondial pour les services climatologiques – Développement des capacités*, chapitre 5). Les utilisateurs n'ont souvent qu'une idée approximative de la qualité des services qu'ils reçoivent ou même de ce qu'ils reçoivent exactement ou alors ils ne sont pas certains que l'information reçue réponde à leurs besoins. En outre, il est fortement recommandé d'apprendre aux utilisateurs et aux clients comment tirer parti au mieux de ces produits et services et de s'assurer qu'ils sont pleinement informés des capacités des SMHN.

Les activités de développement des capacités les plus utiles sont souvent celles qui portent sur les services et la prestation de services et qui prennent en considération l'infrastructure et les moyens humains et institutionnels nécessaires pour assurer la prestation de ces services. Les SMHN seront en mesure de contribuer plus efficacement à la mise en œuvre des plans de développement de leur pays si les services qu'ils fournissent sont élaborés en fonction des besoins des utilisateurs. Cela permettra de s'assurer de la satisfaction des utilisateurs ainsi que de la pérennité et de l'amélioration des services météorologiques et hydrologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Organisation météorologique mondiale, 2014: *Plan de mise en œuvre du Cadre mondial pour les services climatologiques*. Genève.
- , 2014: *Annexe du Plan de mise en œuvre du Cadre mondial pour les services climatologiques – composante Système d'information sur les services climatologiques*. Genève.
- , 2014: *Annexe du Plan de mise en œuvre du Cadre mondial pour les services climatologiques – composante Développement des capacités*. Genève.
- , 2014: *Stratégie de l'OMM en matière de prestation de services et plan de mise en œuvre* (OMM-N° 1129). Genève.
- , 2016: *Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation – Supplement to the Technical Guidelines for the National Adaptation Plan Process* (WMO-No. 1170). Genève.
- , 2018: *Guidelines on Quality Management in Climate Services* (WMO-No. 1221). Genève.

AUTRES LECTURES

- American Meteorological Society, 1993: Guidelines for using color to depict meteorological information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74:1709–1713.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett et P.D. Jones, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*, 111:D12106.
- Hargreaves, G.H., 1975: Moisture availability and crop production. *Transaction of the ASAE*, 18:980–984.
- Jones, P.D., M. New, D.E. Parker, S. Martin et I.G. Rigor, 1999: Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, 37:173–199.
- Khambete, N.N., 1992: Agroclimatic classification for assessment of the crop potential of Karnataka. *Mausam*, 43(1):91–98.
- MacCracken, M., 2002: Do the uncertainty ranges in the IPCC and U.S. National Assessments account adequately for possibly overlooked climatic influences? *Climatic Change*, 52:13–23.
- Palmer, W.C., 1965: Meteorological Drought. *Weather Bureau Research Paper No. 45*. Washington, DC, United States Department of Commerce.
- Peterson, T.C., 2005: Les indices de changements climatiques. *Bulletin de l'OMM*, 54:83–86.
- Peterson, T.C. et M.J. Manton, 2008: Monitoring changes in climate extremes: A tale of international cooperation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89:1266–1271.
- Rayner, N.A., P. Brohan, D.E. Parker, C.K. Folland, J.J. Kennedy, M. Vanicek, T. Ansell et S.F.B. Tett, 2006: Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset. *Journal of Climate*, 19:446–469.
- Sarker, R.P. et B.C. Biswas, 1988: A new approach to agroclimatic classification to find out crop potential. *Mausam*, 39(4):343–358.
- Tufte, E.R., 1990: *Envisioning Information*. Cheshire, Connecticut, Graphic Press.
- United States Global Change Research Program Office (USGCRP), 2000: *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. Washington, DC.
- Wang, B. et Z. Fan, 1999: Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80:629–638.
- Wilhelm, W.W., K. Ruwe et M.R. Schlemmer, 2000: Comparisons of three Leaf Area Index meters in a corn canopy. *Crop Science*, 40:1179–1183.

ANNEXE. ACTIVITÉS INTERNATIONALES RELATIVES AU CLIMAT

1. COORDINATION DES ACTIVITÉS RELATIVES AU CLIMAT

La Commission de climatologie est chargée de promouvoir et de faciliter les activités ayant trait au climat et à ses liens avec le bien-être de l'homme, les activités socio-économiques, les écosystèmes naturels et le développement durable. Voici qu'elles sont précisément ses missions:

1. Coordonner et regrouper les exigences et normes générales en matière de données – observation, collecte, archivage et échange – pour tous les éléments du Programme climatologique mondial;
2. Déterminer les méthodes les plus efficaces pour la gestion des données climatologiques, notamment les données en temps quasi réel, les données indirectes, les données de la télédétection et les métadonnées (renseignements sur les données);
3. Favoriser la diffusion de données, de produits et de méthodes à l'appui de la recherche, des applications, des études d'impact et de la surveillance du système climatique;
4. Apporter son soutien à l'élaboration de déclarations faisant autorité sur le climat, notamment les déclarations annuelles sur l'état du climat mondial et les bulletins périodiques Info-Niño/Niña;
5. Évaluer et faire le point sur les avancées et les applications des prévisions climatiques opérationnelles;
6. Recenser les priorités se rapportant à l'étude climatologique des écosystèmes naturels et aménagés et à la fourniture de l'information climatologique susceptible d'atténuer les problèmes que soulève l'influence des activités humaines sur le climat local et régional;
7. Apporter son concours au renforcement des capacités et au transfert de technologie;
8. Favoriser les activités de recherche et d'évaluation relativement au rôle que tient le climat dans les principaux secteurs sociaux et économiques, en collaboration avec d'autres commissions techniques de l'OMM, d'autres organismes des Nations Unies et les institutions internationales et régionales compétentes;
9. Évaluer les possibilités d'applications des prévisions saisonnières et d'autres services climatologiques au profit de l'activité économique et sociale, notamment en ce qui concerne la réduction du risque de phénomènes dangereux liés au climat et l'utilisation optimale du climat en tant que ressource;
10. Donner des avis sur les questions ayant trait à l'accès aux données et aux services climatologiques et à leur disponibilité.

La Commission favorise l'action de toute une série d'organismes nationaux, régionaux et mondiaux qui prennent part aux activités relatives au climat et en est tributaire. Outre les SMHN, ces organismes comprennent des institutions des Nations Unies, notamment l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), l'Organisation mondiale du tourisme (OMT), le Programme des Nations Unies pour les établissements humains (ONU-Habitat), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). La Commission œuvre aussi en étroite collaboration avec des organisations non gouvernementales, notamment la Fédération internationale des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant Rouge (IFRC), le Conseil

international des sciences (ISC, autrefois Conseil international pour la science (CIUS)), des instituts de recherche, des universités, des associations professionnelles et des organismes d'aide au développement, telle la Banque mondiale.

2. LE PROGRAMME CLIMATOLOGIQUE MONDIAL

Dans les années soixante-dix, il est apparu indispensable de renforcer les efforts déployés à l'échelle internationale et de mieux les coordonner pour combler les lacunes de la connaissance du climat et trouver comment tirer parti des influences multiples du climat sur la société et l'environnement ou comment les atténuer, selon qu'elles sont bénéfiques ou néfastes. En 1974, le Conseil exécutif de l'Organisation météorologique mondiale, convaincu du bien-fondé d'un programme international d'étude du climat, est convenu de jeter les bases du Programme climatologique mondial. En 1978, le Conseil économique et social des Nations Unies a demandé à l'OMM de porter une attention particulière aux éléments de ce Programme qui pourraient aider rapidement et efficacement les responsables de la planification et les décideurs à formuler des programmes et des activités économiques et sociaux dans leurs pays respectifs.

Les participants à la première Conférence mondiale sur le climat, organisée en février 1979, sont convenus que l'influence possible des activités humaines sur le climat constituait un problème auquel il convenait d'accorder une importance particulière. Dans la déclaration découlant de cette Conférence, il est souligné l'urgence, pour les nations du monde entier, de tirer pleinement parti des connaissances actuelles sur le climat, de prendre des mesures afin de faire progresser ces connaissances de manière significative et de prévoir et prévenir les changements climatiques qui seraient dus à l'activité de l'homme et dont les effets seraient néfastes pour le bien-être de l'humanité.

C'est en 1979 que le Huitième Congrès météorologique mondial crée officiellement le Programme climatologique mondial, en déclarant que celui-ci aura besoin de la coopération de nombreuses institutions des Nations Unies et d'autres organisations internationales. La coordination générale du Programme et tout ce qui a trait aux données et aux applications climatologiques incombe à l'OMM, la responsabilité des études des incidences du climat est confiée au PNUE, et l'OMM et le CIUS acceptent de collaborer à la mise en place du programme de recherche sur le climat. Depuis lors, la structure du Programme climatologique mondial et les partenaires qui coopèrent avec l'OMM ont évolué.

Le Programme climatologique mondial comprend quatre grandes composantes. Le Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat (PMDSC) veille à l'efficacité de la collecte et de la gestion des données climatologiques et assure la surveillance continue du système climatique mondial, y compris la détection de la variabilité du climat et des changements climatiques. Le Programme mondial des applications et des services climatologiques (PMASC) favorise la compréhension scientifique du rôle du climat dans les activités humaines, l'exploitation efficace du savoir et de l'information climatologiques au profit de la société, la fourniture de services adaptés aux utilisateurs des différents secteurs socio-économiques et l'établissement de prévisions au sujet des variations marquantes du climat, tant naturelles qu'imputables à l'homme. L'OMM a lancé le projet de Services d'information et de prévision climatologiques (CLIPS) en tant qu'organe de mise en œuvre du PMASC. Le Programme mondial d'évaluation des incidences du climat et de formulation de stratégies de parade (PMICSP), exécuté par le PNUE, évalue les incidences que la variabilité du climat et les changements climatiques pourraient avoir sur les activités économiques ou sociales, et en informe les gouvernements; il aide aussi à formuler les stratégies de parade socio-économiques auxquelles ces derniers et la collectivité pourraient recourir. Le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), parrainé conjointement par l'OMM, l'ISC et la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, cherche à améliorer les connaissances scientifiques fondamentales sur les processus climatiques, afin de déterminer la mesure dans laquelle le climat (y compris sa variabilité et son évolution) est prévisible, de déterminer l'ampleur des effets que les activités humaines ont sur le climat et de parvenir à prévoir le climat. Parmi les activités et les projets que le PMRC regroupe, on compte notamment des études concernant la dynamique et la thermodynamique de l'atmosphère du globe, les

interactions de l'atmosphère avec la surface terrestre ou le cycle mondial de l'eau; la variabilité et la prévisibilité du climat; les relations entre les processus dynamiques, radiatifs et chimiques; les interactions de la cryosphère avec le reste du système climatique; et les interactions biogéochimiques et physiques de l'océan et de l'atmosphère.

En 1990, à l'occasion de la deuxième Conférence mondiale sur le climat, on a estimé qu'il devenait urgent d'acquérir une information détaillée sur les propriétés du système climatique de la Terre et sur son évolution, à l'appui de la détection des changements climatiques, des applications de la climatologie au développement économique et de la progression de la climatologie et de la prévision du climat. En 1991, le Onzième Congrès météorologique mondial a décidé de mettre en place un système mondial d'observation du climat fondé sur la coordination et l'association des programmes d'observation de l'environnement global, opérationnels ou de recherche, existants ou prévus, et sur le renforcement de ces programmes de façon à assurer un flux continu d'information pendant plusieurs décennies.

Le Système mondial d'observation du climat (SMOC) a été créé officiellement en 1992, en vertu d'un mémorandum d'accord entre l'OMM, la COI de l'UNESCO, le PNUE et le CIUS (devenu l'ISC). Le SMOC n'est pas directement chargé d'effectuer des observations ou d'établir des produits à partir des données recueillies. Il œuvre en étroite collaboration avec les systèmes d'observation des organisations et des pays participants, qu'il s'agisse de systèmes existants ou en cours d'élaboration, sur lesquels il se fonde et auxquels il procure un cadre opérationnel d'intégration. Les systèmes et réseaux en question sont les suivants:

- Le Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC (GSN) et le Réseau de stations d'observation en altitude pour le SMOC (GUAN) (qui font partie du Système mondial d'observation relevant de la Veille météorologique mondiale de l'OMM);
- La Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'OMM;
- Le Réseau de référence pour la mesure du rayonnement en surface relevant de l'Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau (GEWEX) menée dans le cadre du PMRC;
- Le Système mondial d'observation de l'océan (GOOS), comprenant plusieurs systèmes d'observation de l'océan tels que le Système mondial d'observation du niveau de la mer;
- Le Système mondial d'observation terrestre, comprenant le Réseau terrestre mondial pour les glaciers et le Réseau terrestre mondial pour le pergélisol;
- Le Système mondial d'observation du cycle hydrologique.

Le concept d'observations de la Terre coordonnées et complètes fut mis en avant lors du premier Sommet sur l'observation de la Terre en 2003. C'est à l'occasion du troisième Sommet sur l'observation de la Terre, organisé en 2005, que fut constitué officiellement le Système mondial des systèmes d'observation de la Terre (GEOSS) pour enrichir les systèmes d'observation nationaux, régionaux et internationaux existants sur lesquels il repose, notamment en coordonnant les efforts, en remédiant aux principales insuffisances, en œuvrant dans le sens de la compatibilité et du partage de l'information, en recherchant une compréhension commune des besoins des utilisateurs et en améliorant la diffusion de l'information aux utilisateurs. Le GEOSS contribue au SMOC en élargissant l'éventail des variables relatives au climat figurant dans le plan de mise en œuvre du SMOC et en aidant les Parties à s'acquitter de leurs engagements au titre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (voir la section 4 ci-dessous).

La troisième Conférence mondiale sur le climat, qui s'est tenue en 2009, était organisée par l'OMM en collaboration avec l'UNESCO, le PNUE, la FAO, le CIUS (devenu l'ISC) et d'autres partenaires intergouvernementaux et non gouvernementaux. La Conférence avait pour thème «La prévision et l'information climatologiques au service de la prise de décisions» et pour perspective de créer «un cadre international pour les services climatologiques qui établisse un lien entre, d'une part, les activités proprement scientifiques d'information et de prévision climatologiques et, d'autre part, la gestion des risques liés au climat et l'exploitation des

possibilités offertes, tout en favorisant l'adaptation à la variabilité et à l'évolution du climat, tant dans les pays développés que dans les pays en développement». Elle a donné aux nations la possibilité d'envisager ensemble la mise en place, au cours des décennies à venir, d'un Cadre mondial pour les services climatologiques (CMSC) approprié, qui permettrait à tous les pays et à tous les secteurs de la société sensibles au climat d'accéder à l'ensemble de plus en plus vaste de services de prévision et d'information climatologiques résultant des développements internationaux récents et actuels de la science et des techniques relatives au climat et d'en tirer profit.

3. LE PROGRAMME D'ACTION POUR LE CLIMAT

Au début des années 1990, une collaboration de plus en plus étroite entre les programmes relatifs au climat relevant de plusieurs organisations internationales conduit à la création par l'OMM du Comité de coordination pour le Programme climatologique mondial. En 1995, un projet de document interinstitutions est publié; il s'intitule: «Programme d'action pour le climat – Programmes internationaux relatifs au climat. Proposition de cadre général». Ce Programme d'action comprend quatre axes principaux: les nouveaux pas à franchir dans le domaine de la climatologie et de la prévision du climat, les services climatologiques dans la perspective d'un développement durable, les observations spécifiques du système climatique, l'évaluation de l'impact des changements climatiques et la formulation de stratégies de parade pour réduire la vulnérabilité. À la tête de ces axes se trouvent l'OMM, la FAO et le PNUE.

En 1995, ayant approuvé le Programme d'action pour le climat, le Douzième Congrès météorologique mondial crée le Comité interinstitutions du Programme d'action pour le climat. Ce comité donne quelques premières orientations mais, compte tenu de l'évolution rapide des questions ayant trait au climat, l'OMM, à la cinquante-troisième session de son Conseil exécutif (2001), envisage de nouveaux mécanismes de coordination en matière de climat. Lors de sa soixante et unième session (2009), le Conseil exécutif de l'OMM décide de ne pas accorder de nouvel élan au Comité interinstitutions du Programme d'action pour le climat, mais d'avoir recours à l'initiative «Unis dans l'action» des Nations Unies pour coordonner les questions relatives au climat à l'échelle des Nations Unies.

4. PROGRAMMES INTERNATIONAUX RELATIFS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Lors de la première Conférence mondiale sur le climat, organisée en 1979, la communauté climatologique internationale soulignait avec inquiétude que les activités humaines qui ne cessaient de progresser pourraient causer des changements climatiques importants à l'échelle régionale et même mondiale et lançait un appel en faveur d'une coopération mondiale visant à chercher à prévoir le comportement futur du climat mondial pour en tenir compte dans le cadre du développement futur de la société. Au cours d'une conférence sur le climat qui s'est tenue à Villach, en Autriche, en 1985, les chercheurs de 29 pays développés et en développement ont confirmé que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre conduirait probablement à un net réchauffement du climat de la planète au XXI^e siècle, ce qui est décrit en détail dans la publication intitulée *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (WMO-No. 661) (voir Working Group III – Impact on climate change, Impact of greenhouse gases on climate, pp. 56–57). Ils ont signalé aussi qu'il se pourrait que les conditions climatologiques passées ne puissent plus constituer à l'avenir une référence valable utile aux projets à long terme en raison du réchauffement du climat mondial attendu, qu'il existe un lien étroit entre les changements climatiques et l'élévation du niveau de la mer, d'une part, et d'autres problèmes environnementaux de grande ampleur, d'autre part, qu'une partie du réchauffement se produira inévitablement compte tenu de l'effet des activités passées et que les politiques en matière d'émissions de gaz à effet de serre pourraient avoir des conséquences considérables pour le degré et la rapidité du réchauffement futur. En réaction aux inquiétudes exprimées, le PNUE,

l'OMM et le CIUS (devenu l'ISC) ont établi en 1986 un Groupe consultatif pour les gaz à effet de serre chargé de veiller à ce que soient entreprises périodiquement des évaluations de l'état des connaissances scientifiques en matière de changements climatiques et de leurs incidences.

En 1987, le Dixième Congrès météorologique mondial a estimé qu'il serait nécessaire d'entreprendre une évaluation scientifique, objective, impartiale et coordonnée à l'échelle internationale des connaissances sur les effets de l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre sur le climat de la planète et de la manière dont ces changements pourraient influer sur les évolutions socio-économiques. Le PNUE et l'OMM décident donc qu'il convient de mettre en place un mécanisme intergouvernemental chargé d'établir des évaluations scientifiques des changements climatiques. Ainsi, en 1988, le Conseil exécutif de l'OMM, avec l'appui du PNUE, établit le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour tenir compte de la nécessité de:

- Déterminer les incertitudes et les lacunes encore inhérentes à nos connaissances des changements climatiques et leurs effets potentiels et élaborer un plan d'action à court terme pour combler ces lacunes;
- Déterminer les informations nécessaires pour évaluer les conséquences sur le plan stratégique d'un changement climatique et les mesures à prendre pour y parer;
- Revoir les politiques nationales et internationales déjà appliquées ou envisagées relatives à la question des gaz à effet de serre;
- Procéder à des évaluations de tous les aspects de la question des gaz à effet de serre au point de vue scientifique et environnemental et assurer le transfert aux pouvoirs publics et aux organisations intergouvernementales de ces évaluations et des autres informations pertinentes dont ils doivent tenir compte dans l'élaboration de leurs programmes intéressant le développement socio-économique et l'environnement.

En novembre 1988, le GIEC crée les groupes de travail qui prépareront les rapports d'évaluation sur les aspects scientifiques de l'évolution du climat (Groupe de travail I), sur les incidences environnementales, sociales et économiques de l'évolution du climat (Groupe de travail II) et sur la formulation de stratégies de parade (Groupe de travail III). À sa quarante-troisième session, l'Assemblée générale des Nations Unies approuve la décision prise par l'OMM et le PNUE de créer conjointement le GIEC et demande:

«une étude d'ensemble et des recommandations sur: a) l'état des connaissances en climatologie et en matière d'évolution du climat; b) les programmes et études concernant les effets sociaux et économiques de l'évolution du climat, y compris le réchauffement de la planète; c) les stratégies envisagées pour retarder, limiter ou atténuer les effets d'une évolution nuisible du climat».

Le GIEC adoptera son premier Rapport d'évaluation le 30 août 1990. Les résultats publiés, qui viendront compléter ceux de la Deuxième Conférence mondiale sur le climat la même année, inciteront les gouvernements à adopter en mars 1994 la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC est paru à la fin de 1995, le troisième, en 2001, le quatrième, en 2007, et le cinquième, en 2014. Les rapports que le GIEC publie servent souvent à étayer les décisions prises en vertu de la Convention-cadre. Ils ont aussi contribué de façon prépondérante aux négociations qui ont conduit à l'adoption du Protocole de Kyoto, un traité international qui est entré en vigueur en février 2005 et qui s'inscrit dans le prolongement de la Convention-cadre et fixe des objectifs juridiquement contraignants et des échéances en ce qui concerne la réduction des émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés. Les rapports du GIEC, qui constituent les meilleures sources d'information scientifique disponibles, guident la mise en œuvre de l'Accord de Paris. Cet accord, fondé sur les constatations scientifiques du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, a été l'une des grandes réussites de la vingt et unième session de la Conférence des Parties (2015). L'Accord a pour objectif de contenir l'augmentation de la température mondiale au-dessous de 2 °C et de viser une hausse de 1,5 °C. Les rapports d'évaluation du GIEC, qui s'appuient sur les travaux de centaines de scientifiques du monde entier, aident les responsables politiques à prendre,

à tous les niveaux, des décisions rationnelles et éclairées. Le fait que le GIEC soit devenu en 2007 colauréat du prix Nobel de la paix avec M. Al Gore, ancien Vice-Président des États-Unis d'Amérique, témoigne du succès remarquable que connaît le processus du GIEC pour informer les décideurs ainsi que le grand public des bases scientifiques de l'évolution du climat.

BIBLIOGRAPHIE

- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 2017: Accord de Paris, https://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2014: Cinquième Rapport d'évaluation, <https://ipcc.ch/report/ar5>.
- Organisation météorologique mondiale, 1986: *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (Villach, Autriche, 9–15 octobre 1985) (WMO-No. 661). Genève.

AUTRES LECTURES

- Conseil des chefs de secrétariat des organismes des Nations Unies pour la coordination, 2008: *Acting on Climate Change: The UN System Delivering as One*, New York.
- Groupe sur l'observation de la Terre (GEO), 2005: *Global Earth Observation System of Systems (GEOSS): 10-year Implementation Plan*. Reference Document GEO 1000R/ESA SP-1284. Noordwijk, Division des publications de l'Agence spatiale européenne, ESTEC.
- , 2007: *GEO 2007–2009 Work Plan. Toward Convergence*. Genève.
- Programme mondial de recherche sur le climat, 2009: *Les réalisations du Programme Mondial de Recherche sur le Climat: connaissances scientifiques pour l'adaptation, la mitigation et gestion des risques climatiques* (OMM/DT-N° 1499). Genève.
- , 2009: *WCRP Implementation Plan 2010–2015* (WMO/TD-No. 1503). Genève.
- , 2013: *The World Climate Research Programme Accomplishment Report*, https://www.wcrp-climate.org/images/documents/reports_flyers/WCRP_report03_2012.pdf.
-

Pour de plus amples informations, veuillez vous adresser à:

Organisation météorologique mondiale

7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300 – CH 1211 Genève 2 – Suisse

Bureau de la communication et des relations publiques

Tél.: +41 (0) 22 730 83 14/15 – Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Courriel: cpa@wmo.int

public.wmo.int