

Université d'Orléans
Polytech'Orléans

Projet en vu de l'obtention du diplôme
d'ingénieur en Traitement de l'Information

**Intercalibration entre images aériennes et images satellitaires
MODIS**

Arnaud Messé

IGN-Polytech'Orléans

Projet soutenu le jeudi 14 septembre 2006
Le jury était constitué de

Roger LEDÉE
Gérald LEMINEUR
Sylvie TREUILLET (tuteur enseignant)
Gilles MARTINOTY (maître de stage)

Table des matières

Introduction	7
1 L’Institut Géographique National	9
1.1 Présentation générale	9
1.1.1 Statut	9
1.1.2 Un peu d’histoire	9
1.1.3 Localisation de l’IGN	10
1.1.4 Vocation	10
1.2 La recherche à l’IGN	12
1.2.1 Les activités	12
1.2.2 Les laboratoires	12
2 La calibration des images aériennes	14
2.1 Introduction	14
2.2 Contexte et enjeux	14
2.3 Principe	15
2.4 Environnement de travail	16
2.5 Le système d’acquisition d’images	16
3 Les effets atmosphériques	18
3.1 Introduction	18
3.2 Description et modélisation des effets atmopshériques	19
3.2.1 Les effets de l’absorption	19
3.2.2 Les effets de la diffusion	21
3.2.3 Interaction entre les effets de diffusion et d’absorption.	25
3.3 Le logiciel 6S	26
4 Le géoréférencement des données	28
4.1 Introduction	28
4.2 Les images aériennes	28
4.2.1 Organisation des images de l’IGN	28
4.2.2 L’orthophoto	29
4.2.3 L’intégration de la FTM	29
4.2.4 La carte des orientations	32
4.3 Les données MODIS	32
4.3.1 Présentation générale	32
4.3.2 Les produits	33
4.3.3 La reprojection des données	34

5 Mise en oeuvre de la calibration et résultats	38
5.1 Introduction	38
5.2 Coefficient de calibration absolu	39
5.2.1 La régression linéaire	40
5.2.2 Les résultats	41
5.3 Correction atmosphérique	42
5.3.1 Description	42
5.3.2 Les résultats	42
5.4 Améliorations du processus	45
5.4.1 Reprojection des données atmosphériques	45
5.4.2 Génération de l'épaisseur optique à 1km	47
5.5 Comparaison avec une mission expérimentale	51
5.5.1 Présentation de la mission	51
5.5.2 Les résultats de la calibration et comparaison	54
5.6 Implémentation de la calibration	56
Conclusion et perspectives	56
A Transmittance des gaz atmosphériques	62
A.1 La transmittance gazeuse	62
A.2 Les fenêtres atmosphériques	64
B Les données 6S	67
B.1 Les données d'initialisation	67
B.2 Les données en sortie	68
C La géodésie	71
C.1 Introduction	71
C.2 Mise en oeuvre de la géodésie	71
C.3 Les systèmes de coordonnées	75
C.4 Les projections	77
C.5 Les changements de systèmes de coordonnées	79
D MODIS	82
D.1 Spécifications	82
D.2 Les produits	84
E Les M-estimateurs usuels	85

Table des figures

1.1	Carte de Cassini	9
1.2	Exemple de produits IGN	11
2.1	Prise de vue	16
2.2	Configuration des caméras	17
3.1	Effets atmosphériques	18
3.2	Angles de position	21
4.1	Exemple d'image aérienne	28
4.2	Exemple de MNT	29
4.3	Orthophoto d'un chantier au sud de Toulouse, à la résolution de 2m	29
4.4	Cas idéal de la FTM	30
4.5	FTM du canal rouge de MODIS sur le Scan	31
4.6	Images des canaux de l'ortho 4.3 incluant les LSF de MODIS	31
4.7	Présentation MODIS	32
4.8	Exemple de produits MODIS, au niveau de la France	33
4.9	Projection sinusoïdale	34
4.10	Images des canaux de MODIS reprojetées en Lambert NTF (réflectance)	35
4.11	Images des canaux de MODIS reprojetées en Lambert NTF (radiance)	36
4.12	Effets du choix de l'interpolateur	36
5.1	Orthophoto de la région située au sud de Paris, à la résolution de 10m	38
5.2	Images des données MODIS reprojetées en Lambert NTF, sur la zone sud de Paris . .	39
5.3	Réponses spectrales des canaux de la caméra	39
5.4	Images des canaux de l'ortho (Figure 5.1), sur la zone sud de Paris	40
5.5	Droites de régression linéaire	41
5.6	Orthophoto (Figure 5.1) calibrée	42
5.7	Orthophoto corrigée	43
5.8	Saturation dans l'orthophoto corrigée	43
5.9	Pourcentages de saturation dans les canaux de l'image 5.1	44
5.10	Moyennes des réflectances	44
5.11	Histogrammes de l'ortho avant et après correction	44
5.12	Données atmosphériques à 1km	45
5.13	Ortho corrigée, avec une épaisseur optique à 1km	46
5.14	Saturation de l'ortho corrigée, avec une épaisseur optique à 1km	46
5.15	Pourcentages de saturation dans les canaux de l'image 5.13	46
5.16	Moyennes des réflectances	47
5.17	Histogramme de l'orthophoto corrigée, avec l'épaisseur optique à 1km	47
5.18	Epaisseurs optiques à 1km	48
5.19	Epaisseur optique à 550nm, à la résolution nominales d'1km	48

5.20 Comparaison épaisseur optique / milieu	49
5.21 Ortho corrigée avec l'épaisseur optique issue de PGE11	49
5.22 Saturation de l'ortho corrigée avec l'épaisseur optique issue de PGE11	50
5.23 Résultats issus de l'image 5.21, avec l'épaisseur optique généré par PGE11	50
5.24 Histogramme de l'orthophoto corrigée avec l'épaisseur optique de PGE11	50
5.25 Caractéristiques des filtres	51
5.26 Réponses spectrales de la caméra combinée avec les filtres spéciaux	51
5.27 Étalonnage radiométrique du système PÉLICAN devant la sphère intégrante	52
5.28 Orthophoto de la ville de Toulouse, à la résolution de 5m	52
5.29 Images des réflectances MODIS reprojetées en Lambert NTF, sur la ville de Toulouse .	53
5.30 Images des données atmosphériques reprojetées en Lambert NTF, sur la ville de Toulouse	53
5.31 Orthophoto 5.28 corrigée radiométriquement	54
5.32 Histogramme de l'orthophoto 5.31	55
5.33 Comparaison avec la calibration en laboratoire	55
5.34 Schéma de l'implémentation logicielle, pour un chantier	57
5.35 Capture écran de l'utilisation de atmcor	58
A.1 Transmittance spectrale d' H_2O	64
A.2 Transmittance spectrale d' O_3	64
A.3 Transmittance spectrale de CO_2	64
A.4 Transmittance spectrale de O_2	65
A.5 Transmittance spectrale de N_2O	65
A.6 Transmittance spectrale de CH_4	65
A.7 Fenêtre atmosphérique	66
B.1 Exemple de données en entrée de 6S	67
B.2 Exemple de données en sortie de 6S (1/3)	68
B.3 Exemple de données en sortie de 6S (2/3)	69
B.4 Exemple de données en sortie de 6S (3/3)	70
C.1 Représentation de la surface terrestre	71
C.2 Repère cartésien	72
C.3 Différences entre les systèmes locaux et spatiaux	74
C.4 Coordonnées cartésiennes	75
C.5 Coordonnées géographiques	75
C.6 SIG	77
C.7 Projections cylindriques	77
C.8 Projections coniques	78
C.9 Représentation des 4 zones de la projection Lambert	78
C.10 Changement de système, cas n°1	79
C.11 Illustration de la transformation géocentrique à 3 paramètres	80
C.12 Illustration de la transformation géocentrique à 7 paramètres	80
C.13 Illustration des transformations géocentriques	81
D.1 Spécifications MODIS 1/2	82
D.2 Spécifications MODIS 2/2	83
D.3 Schéma des produits MODIS	84
E.1 Estimateurs usuels	85

Glossaire

AFGL Air Force Geophysics Lab.

ARTIC Action de recherche du MATIS menant des recherches sur la modélisation des effets radio-métriques dans les images, sur la classification et la détection de changement

CCD Acronyme de Charged Couple Device. C'est la technologie de capteur photosensible utilisée dans la vaste majorité des appareils photo numériques

ENSG École Nationale des Sciences Géographiques

EOS Earth Observation System

FTM Fonction de Transfert en Modulation

Géodésie Science à la fois astronomique, géophysique et mathématique qui a pour objet de définir quantitativement la forme et les dimensions de la Terre

Géoréférencement Opération qui consiste à attribuer à un ensemble de phénomènes les coordonnées géographiques permettant de définir leur position exacte, par rapport à un système de référence géodésique

Grid Données rééchantillonnées suivant une grille de géoréférence

IGN Institut Géographique National

GNU General Public License

HDF Hierarchical Data Format, format de sauvegarde pyramidal, spécialement conçu pour faciliter les échanges, l'analyse, et l'archivage de données scientifiques

HEG HDF-EOS to GeoTiff Conversion Tool

LCC Lambert Conique Conforme

LSF Line Spread Function

MATIS Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Images pour la Stéréo restitution

MODIS MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer

MNT Modèle Numérique de Terrain, modèle tridimensionnel représentant, sous forme numérique, le relief d'une portion du territoire

MRT MODIS Reprojection Toolkit

MRTSwath MODIS Reprojection Swath Toolkit

Nadir Point de la surface terrestre qui se trouve sur la verticale du centre de masse du satellite considéré

NASA National Aeronautics and Space Administration est l'administration gouvernementale responsable du programme spatial des États-Unis d'Amérique

ONERA Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales est l'équivalent français de la NASA

- Orthophoto** Photographie rectifiée pour corriger les distorsions naturelles causées par la perspective de l'avion et par la forme du terrain, et géoréférencée
- PÉLICAN** Plate-forme Et Logiciels Informatiques de Caméras Aéroportées Numériques
- Photogrammétrie** Technique permettant, à partir d'un couple stéréoscopique de photographies, d'étudier et de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un phénomène quelconque
- Projection** Système de correspondance entre les points de la surface du globe et ceux de la surface plane de la carte
- PSF** Point Spread Function
- Radiométrie** La radiométrie consiste à mesurer le flux d'énergie associé aux rayonnements électromagnétiques
- Réflectance** Rapport de l'énergie réfléchie par un milieu matériel à l'énergie incidente
- RVB** Rouge Vert Bleu
- Scan** Direction parallèle à la barette CCD, ou direction normale à Track
- SIG** Système d'Information Géographique, ensemble des structures, des méthodes, des outils et des données constitué pour rendre compte des phénomènes localisés dans un espace
- Swath** Données brutes de MODIS, non géoréférencées
- Télédétection** Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci
- Track** Direction du sens de propagation de l'avion ou du satellite
- UTM** Universal Transverse Mercator
- WGS84** World Geodesic System 1984
- 6S** Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

Introduction

Dans le cadre de mon stage de fin d'étude que j'ai effectué à l'Institut Géographique National (IGN), j'ai travaillé sur un projet proposé par l'action de recherche ARTIC du laboratoire MATIS. Cet axe de recherche s'intéresse aux problèmes liés à la classification des milieux, ainsi qu'à ceux de cohérence entre les images et les bases de données topographiques, faisant intervenir la radiométrie et la texture mesurées dans les images.

Mon projet consistait en l'intercalibration entre images aériennes et images satellitaires MODIS, dont l'objectif est d'effectuer une calibration absolue des images de l'IGN, en utilisant un logiciel de transfert radiatif nommé 6S à partir de données atmosphériques, afin d'apprécier les grandeurs physiques réelles du terrain. Ceci permettra notamment d'améliorer les travaux de télédétection.

Ainsi, après une description du laboratoire, du matériel informatique et de l'acquisition des images aériennes, nous étudierons les effets atmosphériques et leur modélisation. Ensuite, nous considérerons les travaux effectués sur le géoréférencement des différentes données liées à la calibration. Et enfin, nous détaillerons le processus de calibration mis en place, avant d'exposer les résultats obtenus.

Chapitre 1

L’Institut Géographique National

1.1 Présentation générale

1.1.1 Statut



L’Institut Géographique National (IGN), créé en 1940, a reçu le statut d’établissement public à caractère administratif et commercial, le 1^{er} janvier 1967 sous la tutelle du Ministère de l’Équipement, de l’aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer. L’IGN a un budget annuel de plus de 130 Millions d’euros, et est financé pour moitié par l’État et pour moitié par des recettes commerciales.

Cet institut a pour mission principale d’assurer la production, la mise à jour, l’édition et la diffusion de données géographiques de référence en France.

1.1.2 Un peu d’histoire

Jusqu’au milieu du XVII^e siècle, il n’existe en France aucun organisme officiel chargé de production de cartes. L’Académie des Sciences, créée en 1666 par Colbert, ministre de Louis XIV, réalise les premières opérations de levée scientifique du territoire national. En 1750, Louis XV charge Cassini de Thury de réaliser la carte "géométrique" de l’ensemble de la France, gravée en 170 feuilles à l’échelle du 1 :86 400 (Figure 1.1).

A partir du XVIII^e siècle, le corps spécialisé des ingénieurs géographes s’organise et va progressivement donner au Dépôt de la Guerre une vocation d’organisme producteur de cartes.

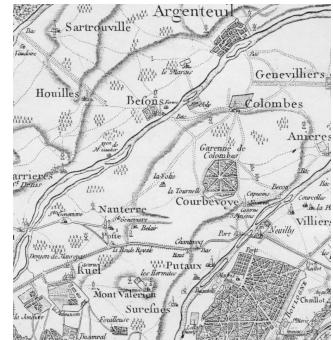


FIG. 1.1 – Carte de Cassini

Le 27 juin 1940, Louis Hurault, parvient à faire signer un des derniers décrets républicains, supprimant le Service Géographique de l’Armée (SGA) et créant l’Institut Géographique National, dont il devient le premier directeur. Durant les années d’occupation, la direction de l’IGN s’emploie à regrouper dans Paris le potentiel humain et matériel dispersé dans le sud-ouest pour ne pas que l’information géographique ne passe aux allemands.

En 1945, l’essentiel de la production consiste à satisfaire les besoins cartographiques des armées françaises et alliées (au cours de cette année, une vingtaine de millions de cartes sont faites par l’imprimerie de l’IGN et des sous-traitants).

En 1980, le territoire national est totalement cartographié au 1 :25000 et l'IGN, doté de matériels modernes et d'un personnel performant, est prêt à négocier un véritable virage technologique avec le spatial, la numérisation des processus, le développement des bases de données qui font de l'information géographique un réel outil d'aide à la décision.

En 1985, un acte majeur : la signature du premier contrat de plan clarifie les relations entre l'état et l'IGN, ce dernier étant reconnu par l'état comme établissement producteur capable de réussir sa modernisation et d'améliorer réellement sa productivité. Ainsi, en un demi siècle, l'IGN a prouvé, qu'après avoir été considéré comme un digne successeur du prestigieux Service Géographique et l'Armée, il figurait désormais parmi les trois ou quatre services géographiques les plus performants du monde. Cette situation, il la doit principalement à la parfaite symbiose qui existe entre les quatre fonctions principales qui constituent l'essentiel de son activité : formation, recherche, production, et commercialisation.



Le 10 septembre 2003, l'état et l'IGN signent le quatrième contrat d'objectifs et de moyens pour les années 2003-2006 qui affirme leur conception commune de l'équipement géographique du territoire national. Cet acte est construit autour des missions de service public confiées à l'IGN qui affiche sa volonté de poursuivre son évolution pour répondre aux nouvelles missions confiées par l'État et aux demandes des clients. Ce contrat prépare le moyen terme et trace les pistes pour le futur.

1.1.3 Localisation de l'IGN

L'Institut Géographique National regroupe près de 1800 personnes réparties dans divers sites :

- la direction Générale (Paris)
- IGN France International (Filiale à 62,5% - Paris)
- IGN Espace (Toulouse) : spécialisé dans l'imagerie satellite
- les Services Techniques (Saint-Mandé) : établissement principal
- le Service des activités aériennes (Creil)
- l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) à Marne-La-Vallée
- 15 agences commerciales régionales

1.1.4 Vocation

Les missions de l'IGN sont variées :

- exécuter les travaux nécessaires à l'implantation et à l'entretien d'un réseau géodésique et d'un réseau de nivellation de précision, à la couverture photographique aérienne du territoire français (tous les 5 ans), à l'établissement et à la tenue à jour des cartes topographiques de base et des cartes dérivées
- accomplir les travaux relatifs à la constitution de bases de données géographiques, à la télédétection aérienne et spatiale à caractère géographique, et à l'élaboration des cartes thématiques
- effectuer les recherches d'intérêt général correspondant à ces activités en liaison avec d'autres organismes scientifiques et techniques, publics ou privés
- établir, publier, diffuser et vendre les produits correspondants, conserver, gérer, mettre à la disposition du public la documentation liée à ses activités
- assurer le fonctionnement de l'ENSG



La production des cartes

Le principal site de production est Saint-Mandé sur lequel une imprimerie intégrée permet l'édition de dix millions de cartes par an. Les techniques utilisées par l'IGN pour produire les cartes sont les suivantes :

- la géodésie, qui a pour but de déterminer un ensemble de points de base sur l'ensemble du territoire. Ces points déterminés avec précision sont matérialisés par des bornes géodésiques. La cohérence sur l'ensemble du territoire est de l'ordre de 20 cm
- le niveling, qui sert à déterminer un réseau de points altimétriques. La cohérence sur l'ensemble du territoire est de l'ordre du décimètre
- la restitution photogrammétrique, à partir des photos aériennes
- le complément terrain, qui a pour but de relever les détails non vus sur les photos (noms de villes, routes, présence d'un sentier dans les bois, etc...)
- la cartographie représentant les données restituées avec des conventions établies

L'offre

L'IGN fabrique et commercialise un certain nombre de produits :

1. des cartes à petite échelle
2. des cartes thématiques
3. des orthophotographies
4. de la topographie et de la cartographie à l'étranger
5. des prises de vues à la demande en France ou à l'étranger
6. des bases de données.

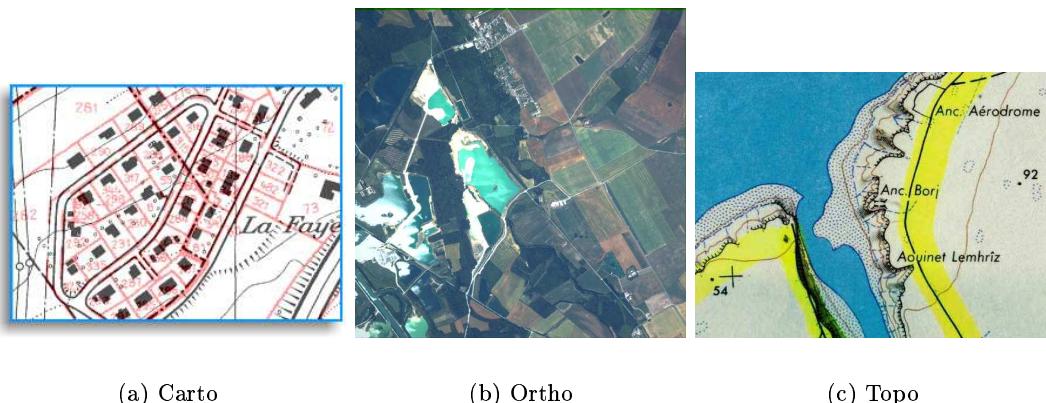


FIG. 1.2 – Exemple de produits IGN

1.2 La recherche à l'IGN

1.2.1 Les activités

L'IGN a pour mission d'effectuer des recherches d'intérêt général correspondant à ses activités de production. La recherche de l'IGN participe donc aux évolutions techniques qui ont profondément modifié l'activité de l'établissement, avec l'émergence de l'informatique, de la télédétection, de la géodésie spatiale et des bases de données géographiques ainsi que le renouveau des instruments aéroportés et de la cartographie.

La mission de recherche de l'IGN s'appuie sur l'activité de production (ou plutôt, elle la précède). Les actions de recherche sont finalisées, conçues pour aboutir à moyen ou long terme à un procédé, un produit ou un service. Plus précisément, les orientations de la recherche depuis quelques années sont motivées par l'amélioration de la productivité de l'IGN. Les études sur la détection de changements et la mise à jour des bases de données en sont des exemples. Une autre part de la recherche concerne le développement de nouveaux produits. Les images de la caméra numérique ou la diffusion des mises à jour constituent des exemples de produits nouveaux et novateurs.

La recherche se situe en amont du processus existant pour la production d'information géographique. Elle s'articule autour de quatre disciplines. A chaque discipline correspond un laboratoire.

1.2.2 Les laboratoires

Le COGIT (*Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique*)

Ce laboratoire étudie les problématiques liées à l'utilisation des données topographiques vectorielles. Ses compétences concernent les bases de données localisées et la cartographie. Les recherches portent sur la gestion, la dérivation et la diffusion de l'information géographique.

Le LAREG (*Laboratoire de Recherche En Géodésie*)

C'est un laboratoire de l'ENSG couvrant plusieurs secteurs de la géodésie, à travers des coopérations françaises et internationales :

- systèmes et réseaux de référence terrestres
- géodésie spatiale sur les systèmes GPS et DORIS
- géophysique
- champ de pesanteur terrestre

Le LOEMI (*Laboratoire d'Optique, d'Électronique et de Micro-Informatique*)

Ce laboratoire développe des instruments spécifiques aux travaux de l'IGN aussi bien pour sa production que sa recherche. Ces recherches visent à améliorer les prises de vue aériennes, par le développement de nouveaux capteurs et des techniques de trajectographie. Le LOEMI étudie aussi des instruments de métrologie.

Le MATIS (*Méthodes d'Analyses et de Traitement d'Images pour la Stéréo-restitution*)

L'IGN, en tant que producteur de cartes et de bases de données topographiques, a un gros besoin dans le domaine de l'aide à la restitution de données géographiques à partir d'images numériques. En effet, une très large part des données provient d'une saisie manuelle à partir de couples stéréoscopiques d'images aériennes.

Toute contribution pour alléger la charge de travail de saisie est souhaitable pour réduire les coûts et les délais.



Les recherches menées au MATIS portent sur l'interprétation de scènes, la reconnaissance et la restitution d'objets géographiques et contribuent à l'amélioration de la production (et de la mise à jour) des bases de données (image ou vecteur) actuelles et futures à partir des données images "brutes". Elles comprennent l'évaluation des processus tant sur la précision, la fiabilité et l'exhaustivité des résultats, que sur les performances et l'acceptabilité pour l'opérateur de production.

Les compétences du laboratoire portent sur le traitement d'images et la vision par ordinateur (vision stéréoscopiques artificielle), la physique de l'image et les problèmes inverses, la reconnaissance de formes, l'algorithmie discrète, les mathématiques appliquées, la théorie des graphes... ainsi que l'informatique et la programmation.

Il existe quatre axes de recherche dans le laboratoire MATIS selon l'échelle de temps dans laquelle elles s'inscrivent :

- ARTIC :

Cet axe de recherche s'intéresse aux problèmes liés à la classification de zones urbaines et rurales à partir d'images aériennes, ainsi qu'à ceux de cohérence entre les images et les bases de données topographiques. Ces problématiques font intervenir comme éléments essentiels la radiométrie et les textures mesurées dans les images. Une bonne compréhension et une bonne modélisation des phénomènes contribuant aux radiométries mesurées dans les images sont donc nécessaires. Les recherches sur la radiométrie ont, de plus, un intérêt propre pour de nombreuses applications, particulièrement dans le contexte IGN (amélioration des problèmes radiométriques rencontrés avec les ortho-images, correction du voile, etc...).

- LASER :

Il s'occupe de la valorisation des données LASER, une composante étudie et soutien le projet *litto3D* et une composante mène des recherches méthodologiques sur le traitement couplé LASER et images pour des produits très grande échelle.

- BRIGE :

L'objectif général de BRIGE est la production automatique ou semi-automatique de données vectorielles tridimensionnelles en milieu urbain, pour l'aide à la constitution automatique de bases de données urbaines 3D à grande résolution. Il s'agit d'extraire la forme des bâtiments, structure interne des toits comprise.

- ARCHI :

Les travaux de cette action de recherche s'inscrivent dans la définition d'outils pour la constitution de futures bases de données urbaines à très grande échelle. L'objectif général de l'activité est la constitution automatique de bases de données image de type GEOREF3D (prises de vues géoréférencées), mixte vectorielle/image de type BDU3D (Bases de Données Urbaines 3D) et mixte vectorielle/image de type PATRIM3D (modèles 3D d'édifices patrimoniaux).

Chapitre 2

La calibration des images aériennes

2.1 Introduction

Ce projet est né à l'initiative de M. Gilles Martinoty, responsable de l'action de recherche ARTIC du MATIS. Il a pour but de réaliser une calibration absolue approchée des images aériennes de l'IGN.

2.2 Contexte et enjeux

Le MATIS mène depuis plusieurs années des activités de recherches dans le domaine de la modélisation radiométrique des images aériennes acquises au cours des campagnes de prises de vue menées par l'IGN avec ses avions. Dans ce cadre, on vise à comprendre et à modéliser les effets radiométriques qui contribuent au signal reçu par la caméra numérique aéroportée, notamment les effets dus à l'atmosphère (voile atmosphérique), ceux dus au type d'objets vus (effets de réflectance directionnelle), etc... L'objectif est de pouvoir corriger ces effets dans les images RVB de manière à pouvoir estimer au mieux la réflectance des objets au sol, qui est le signal intéressant.

Pour les chercheurs utilisant la télédétection, la réalisation des corrections atmosphériques est une étape difficile et peu naturelle du traitement des images. Certains, avant de l'avoir pratiquée, imaginent qu'elle va supprimer les défauts d'images de qualité médiocre, voire nuageuses ; d'autres abandonnent rapidement devant la complexité apparente de la méthode. Il est donc indispensable de s'interroger sur l'intérêt mais aussi sur les limites des méthodes de correction atmosphérique.

Deux remarques préliminaires s'imposent :

1. La correction des effets de l'atmosphère sur une image est toujours associée à un étalonnage en grandeurs physiques (réflectances) des comptes numériques, qu'elle complète en vu d'accéder à une propriété physique propre à la surface
2. Dans l'état actuel des méthodes, la correction atmosphérique est toujours partielle et approximative ; elle est inopérante lorsque les effets de l'atmosphère sont trop importants. Elle repose le plus souvent sur des hypothèses simplificatrices. L'usage d'un logiciel conduira souvent à une évaluation des effets de l'atmosphère sur l'image traitée plutôt qu'à une correction effective

D'une manière générale, on peut affirmer que la pratique d'un traitement radiométrique incluant la correction atmosphérique n'est pas nécessaire, et même parfois gênante pour :

- l'utilisation d'une seule image fondée sur l'interprétation ou l'analyse visuelle, avec ou sans travail préliminaire d'amélioration de l'image
- la pratique des classifications dirigées à partir d'échantillons pris sur l'image à classer
- les travaux de traitement d'image à base de morphologie mathématique

La correction devient en revanche indispensable dès que le traitement d'images de télédétection a pour but :

- d'accéder à des propriétés quantifiées des surfaces
- de comparer ces grandeurs physiques tirées de l'image à des mesures radiométriques de terrain
- d'effectuer des comparaisons multidiplinaires entre des images provenant du même capteur ou de capteurs et de satellites différents
- assurer une reproductibilité de méthodes d'identification ou de classification des surfaces, sans devoir reprendre l'analyse d'échantillons pris sur l'image à traiter

Actuellement, la correction du voile sur les images de l'IGN est effectuée "à la main" par un opérateur, à l'aide d'un logiciel de traitement d'images (ex : PhotoShop). Le coût horaire estimé pour une telle opération peut représenter quelques dizaines d'heures, ce qui est important dans la chaîne de production. De plus, cette correction est approximative et dépend entièrement de l'appréciation de l'opérateur. C'est pourquoi, l'idée est apparue de réaliser cette correction et cette calibration de manière automatique d'une part pour avoir des résultats plus performants et d'autre part pour diminuer la durée de ce processus et par la même occasion le coût.

2.3 Principe

On va chercher à obtenir une approximation des réflectances au sol vues dans les images aériennes.

Classiquement, une façon possible de le faire est de connaître la calibration absolue des caméras utilisées, qui correspond au coefficient permettant de passer d'un compte numérique à une valeur physique en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$, et d'autre part une estimation de la composition atmosphérique au moment de la prise de vue. Il est alors possible d'inverser l'équation de transfert radiatif, ce qui permet d'obtenir les réflectances au sol à partir des mesures dans les images.

Cependant, dans la pratique, cette approche n'est pas envisageable, car on ne dispose pas de mesures atmosphériques pendant les prises de vues ni d'évaluation en laboratoire du coefficient de calibration absolue. Nous proposons donc d'utiliser une technique alternative. En effet, le satellite MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) fournit tous les jours des images du territoire français. Or ce satellite acquiert des données dans 36 bandes spectrales différentes, ce qui lui permet d'évaluer la composition de l'atmosphère assez finement, et donc d'obtenir des réflectances au sol assez précises. Le principe consiste à utiliser ces données de réflectances au sol et de composition atmosphériques pour réaliser l'intercalibration de nos caméras.

Les étapes :

- les données MODIS sont commandées et récupérées sur un serveur internet. Des images de réflectances au sol et de composition atmosphériques sont directement accessibles. Ces données doivent tout d'abord être géoréférencées dans un système identique à celui de nos images aériennes
- le logiciel de transfert radiatif 6S¹ permet, connaissant les deux éléments précédents, et moyennant certaines approximations, d'obtenir les images en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ au niveau de l'avion
- on transforme nos images aériennes en images à la résolution du satellite MODIS, en incluant la FTM des capteurs de celui-ci. On cherche le coefficient de régression reliant les valeurs en comptes numériques à celles des images en grandeurs physiques. Le coefficient de la regression correspond au coefficient de calibration absolue approché
- l'inversion de l'équation du transfert radiatif permet de corriger le voile dans nos images, et donc d'obtenir les réflectances au sol dans nos images aériennes

2.4 Environnement de travail

Le stage s'est effectué sur un PC (processeur Intel Pentium 4 à 2,4 GHz et 6 Go de mémoire) évoluant sous Linux. Le développement s'est déroulé sous Emacs. Les outils de traitement d'images ont été développés en C++ et basés sur une librairie développée au sein de laboratoire MATIS, appelée NOYAU. Le NOYAU est un environnement partagé à la base des programmes de recherche effectués par le MATIS. Il est basé sur une bibliothèque gratuite (régie par la licence GNU) de création d'interfaces (Wxwidgets). A l'aide d'une documentation en ligne très précise, il permet de créer des applications fonctionnelles rapidement sans se soucier de l'interface. En effet, cette librairie est particulièrement étudiée pour une prise en main et un travail rapide sur les images, les traitements 2D et 3D. Les fonctions du NOYAU peuvent être mises à jour par chacun des chercheurs, la nouvelle version étant ensuite disponible à tout le collectif de recherche du laboratoire.

2.5 Le système d'acquisition d'images



La matière première de notre travail est l'image. Les images sont issues de prises de vue par une caméra numérique aéroportée (Figure 2.1).

L'électronique des têtes de caméra a été entièrement conçue au LOEMI. Les têtes de caméras ont également été produites à l'IGN avec l'aide des ateliers de mécanique. Les têtes actuellement en service sont équipées de CCD Kodak 16 Mégapixels (4096 x 4096 pixels). 2 têtes sont équipées de capteurs couleur KAF-16801CE et les 15 autres de capteurs noir et blanc KAF-16801LE.

FIG. 2.1 – Prise de vue

¹6S : Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

Ces CCD sont équipés de dispositif anti-éblouissement (anti-blooming) de 4096 lignes par 4096 colonnes de pixels sensibles. La taille élémentaire de la matrice est de $9 \times 9 \mu\text{m}$. Le puit de potentiel de ces pixels est de 55000 électrons. Cette capacité de remplissage maximum et l'électronique qui a été placée en aval du capteur permet d'acquérir des images avec une dynamique supérieure à 2000 niveaux de gris nous conduisant à encoder chaque pixel image sur 12 bits. Les caméras sont équipées d'un système de compensation du filé en temps réel, permettant de translater l'image au niveau du détecteur pendant la pose.

La configuration de la caméra, est dite "classique" (Figure : 2.2) : la caméra est en réalité composée de quatres têtes optiques, c'est à dire une caméra quadri-canal. Cette configuration est actuellement utilisée pour les travaux de prises de vue de vocation. Généralement, on utilise les canaux rouge, vert, bleu et proche infrarouge.

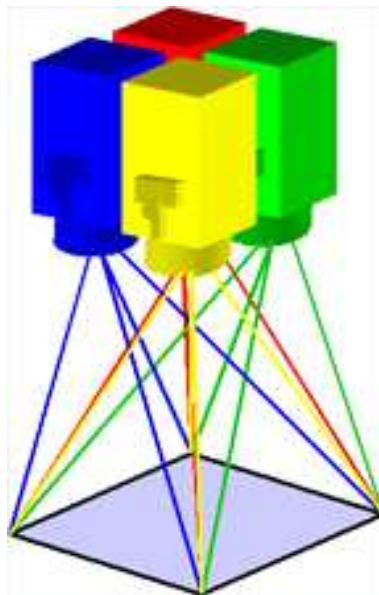


FIG. 2.2 – Configuration des caméras

Le système aéroporté est appelé Pélican : Plate-forme Et Logiciels Informatiques de Caméras Aéroportées Numériques.

Chapitre 3

Les effets atmosphériques

3.1 Introduction

Dans le spectre solaire, les capteurs météorologiques ou les caméras d'observations de la Terre mesurent la radiance refléchie par le système atmosphère+surface de la Terre illuminé par le Soleil. Ce signal dépend de la réflectance de la surface, mais il est aussi perturbé par deux phénomènes atmosphériques : l'absorption gazeuse et la diffusion par les molécules et les aérosols¹.

Dans un cas idéal, sans interférences avec l'atmosphère, les radiations solaires illuminent la surface. Une partie des photons incidents est absorbée par la surface, et le reste est reflété vers l'espace. La radiance mesurée dépend directement des propriétés de la surface : cette radiance est le signal utile, caractérisant la réflectance de la surface.

Dans la réalité, le signal est perturbé par l'atmosphère. Seulement une fraction des photons provenant de la cible parvient au capteur, typiquement 80% à $0.85\mu\text{m}$ et 50% à $0.45\mu\text{m}$, ainsi la cible semble moins réfléchissante. Les photons ont été absorbés par des aérosols ou des gaz atmosphériques.

Pendant que des photons sont absorbés, d'autres sont diffusés. L'interaction entre les molécules et les aérosols non absorbants est élastique, et les photons sont immédiatement ré-émis dans une direction différente de celle incidente.

La diffusion par les molécules gazeuses, dont la dimension est très faible par rapport à la longueur d'onde est une diffusion de type Rayleigh. Elle est très dépendante de la longueur d'onde et affecte fortement les courtes longueurs d'onde du spectre solaire. La diffusion par les aérosols, particules dont la dimension est du même ordre de grandeur que celle de la longueur d'onde, est très anisotrope.

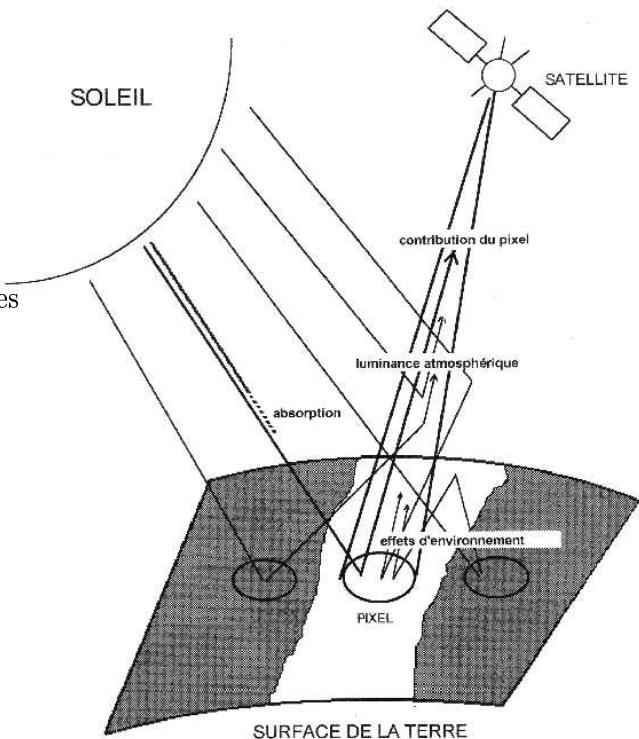


FIG. 3.1 – Éffets atmosphériques

¹Les aérosols désigne l'ensemble des particules, solides ou liquides, en suspension dans l'atmosphère.

Elle obéit à la théorie de Mie : le changement de direction de propagation se fait de façon préférentielle dans la direction de propagation initiale. Elle est beaucoup moins sensible à la longueur d'onde que la diffusion de Rayleigh.

Après une ou plusieurs diffusions, les photons quittent l'atmosphère ou sont comptés dans la somme des photons atteignant le capteur. Cependant, leurs chemins sont complexes comme expliqué ci-après (Figure 3.1).

Premièrement, si nous considérons les photons arrivant du Soleil et diffusés par l'atmosphère sur le trajet Soleil-surface :

- un certain nombre d'entre-eux ne parvient pas à la surface et est diffusé vers l'espace. Ces photons sont pris en compte dans la quantité de radiation perçue par le capteur. Ce signal est un terme d'interférence, il n'apporte pas d'information sur la cible
- les photons restants contribuent à l'illumination du sol par l'intermédiaire de la diffusion et correspond à l'éclairage du ciel
- il y a également un terme d'éclairage direct

Dans une seconde étape, considérons les photons réfléchis par la surface et diffusés par l'atmosphère sur le trajet surface-capteur. De la même manière, une fraction sera diffusée vers le capteur. Cette composante doit être prise en considération avec précaution. Si la surface est uniforme, cette composante est utile, mais si la surface est irrégulière, ce terme introduira des effets environnementaux perturbateurs.

Finalement, une fraction des photons réfléchis par la surface peut être diffusée par l'atmosphère vers la surface et ainsi créer une troisième composante d'illumination, c'est l'effet de capture, les photons interagissent successivement avec la surface et l'atmosphère, mais en général, la convergence est rapide et après une ou deux interactions, le phénomène est négligé.

A partir de cette description qualitative, on peut en déduire un modèle des effets atmosphériques basé sur :

- une approche précise de l'absorption par les gaz atmosphériques,
- un traitement complet des processus de diffusion,
- et une approximation de l'interaction entre les deux processus.

3.2 Description et modélisation des effets atmopshériques

Le modèle atmosphérique que nous allons voir est celui utilisé par le logiciel de transfert radiatif 6S [16].

3.2.1 Les effets de l'absorption

Dans le spectre solaire, l'absorption gazeuse atmosphérique est principalement due à :

- l'oxygène (O_2),
- l'ozone (O_3),
- les vapeurs d'eau (H_2O),
- de dioxyde de carbone (CO_2),
- le méthane (CH_4)
- et l'oxyde de nitrate (N_2O)

Les gaz O_2 , CO_2 , CH_4 , et N_2O sont considérés constants et uniformément mélangés dans l'atmosphère, les concentrations de H_2O et O_3 dépendent du temps et de la localisation, ces deux derniers gaz sont les plus importants acteurs dans les effets atmosphériques.

Les gaz absorbent la radiation en changeant leur état rotationnel, vibrationnel, ou électronique. Les variations de l'énergie rotationnelle sont faibles et correspondent à l'émission ou l'absorption de photons de faible fréquence, qui sont localisés dans les micro-ondes ou le lointain infra-rouge. Les transitions vibratoire correspondent à des niveaux d'énergie plus élevés qui situent le spectre d'absorption dans le proche infra-rouge. Enfin, les transitions électroniques correspondent à une énergie encore plus importante, et donnent une élévation de la bande d'absorption ou d'émission dans le visible et l'ultra-violet. Ces transitions s'opèrent par paliers, les coefficients d'absorption varient très rapidement avec la fréquence et présentent une structure complexe.

A présent, vu que l'intensité et la forme de chaque ligne dans les bandes d'absorption sont connus, l'absorption peut être exactement calculée en utilisant une intégration ligne par ligne. Sachant que le modèle nécessite un temps de calcul important, il est nécessaire d'utiliser un modèle équivalent de bandes. Le spectre solaire est divisé avec un intervalle spectral de $10cm^{-1}$, en utilisant la base de données HITRAN [8]. Cette largeur permet d'avoir une description des variations spectrales de la transmission et des bandes d'absorption des gaz précise.

Les modèles de bandes utilisés sont basés sur des exponentielles aléatoires, Goody [5] pour les vapeurs d'eau, et Malkmus [9] pour les autres gaz. Quand plusieurs gaz présentent des bandes d'absorption, la transmission totale correspond au produit de la transmission de chaque gaz.

Une description complète du modèle statistique est donné dans l'annexe A.1. Les résultats sont décrits pour chaque gaz entre 0.25 et $4\mu m$ ci-après (Figures A.1 à A.6), avec un modèle standard d'atmosphère (US-1962) et le Soleil au nadir² (la masse de l'air égale à 1.0). La contribution des vapeurs d'eau (Figure A.1) affecte principalement les longueurs d'ondes supérieures à $0.7\mu m$. O_3 présente une absorption significative entre $0.55\mu m$ et $0.65\mu m$ et limite les observations de la Terre à des longueurs d'ondes inférieures à $0.35\mu m$ (Figure A.2). La contribution du CO_2 apparaît au delà de $1\mu m$, mais de façon moins importante que l'eau (Figure A.3). L'influence de l' O_2 est limité à une fine bande vers $0.7\mu m$ (Figure A.4). Le CH_4 présente deux bandes d'absorption à $2.3\mu m$ et $3.35\mu m$ (Figure A.6). Finalement, la contribution du N_2O apparaît dans deux bandes à $2.9\mu m$ et $3.9\mu m$ (Figure A.5).

Pour résumer, nous avons de bonne fenêtre pour l'observation de la Terre dans le spectre solaire dans :

- le visible, entre 0.4 et $0.75\mu m$
- et le proche et moyen infrarouge : à 0.85, 1.06, 1.22, 1.6, $2.2\mu m$
(Figures A.7)

²En astronomie, le nadir est le point de la sphère céleste représentatif de la direction verticale descendante, en un lieu donné (par opposition au zénith).

3.2.2 Les effets de la diffusion

Le cas d'une cible Lambertienne uniforme

Dans un premier temps, supposons que la surface a une réflectance Lambertienne uniforme et que l'atmopshère est horizontalement uniforme, les quantités mesurées peuvent être exprimées en terme de réflectance équivalente, ρ^* défini par :

$$\rho^* = \frac{\pi L}{\mu_s E_s} \quad (3.1)$$

avec L la radiance mesurée, E_s le flux solaire en haut de l'atmopshère et $\mu_s = \cos \theta_s$ où θ_s est l'angle zénithal du soleil.

L'épaisseur optique de l'atmopshère est noté τ , la direction de visée peut être référencée par l'angle zénithal θ_v et l'angle azimuthal ϕ_v , et les angles du soleil par θ_s et ϕ_s (Figure 3.2). ρ_t est la réflectance de la cible. Les problèmes d'absorption ne sont pas considérés dans cette partie.

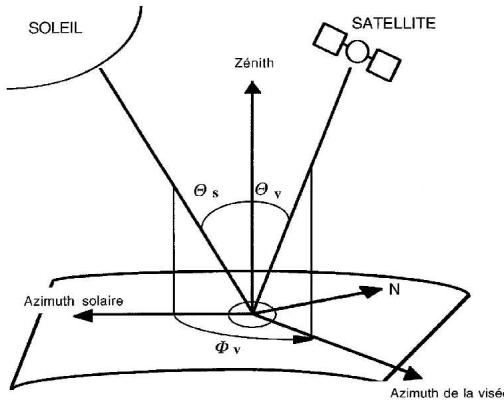


FIG. 3.2 – Angles de position

Il est commode d'exprimer le signal reçu par le capteur comme une fonction d'ordres successifs d'interaction de radiation dans le système couplé surface+atmosphère.

Pour l'illumination de la surface, nous avons par magnitudes décroissantes :

- le flux solaire direct, atténué par l'atmopshère E_{sol}^{dir} :

$$E_{sol}^{dir} = \mu_s E_s e^{-\frac{\tau}{\mu_s}} \quad (3.2)$$

- l'irradiance solaire diffuse E_{sol}^{diff} , indépendante des propriétés de la surface et caractérisée par un facteur de transmittance diffuse $t_d(\theta_s)$ défini par :

$$t_d(\theta_s) = \frac{E_{sol}^{diff}(\theta_s)}{\mu_s E_s} \quad (3.3)$$

- un second flux diffus dû au mécanisme de capture, il dépend de l'environnement de la cible et correspond aux réflexions et diffusions successives entre la surface et l'atmopshère. Si l'albédo sphérique³ de l'atmosphère est notée S , on peut écrire ce terme comme ceci :

$$[e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + t_d(\theta_s)][\rho_t S + \rho_t^2 S^2 + \dots] \quad (3.4)$$

³L'albédo est la réflectance d'un élément homogène de surface, dans une direction et à une longueur d'onde déterminées. L'albédo s'exprime en pourcentage d'énergie réfléchie.

L'illumination totale normalisée au niveau de la surface s'écrit :

$$\frac{T(\theta_s)}{[1 - \rho_t S]} \quad (3.5)$$

où $T(\theta_s)$ est la transmittance totale :

$$T(\theta_s) = e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + t_d(\theta_s) \quad (3.6)$$

Au niveau du capteur, la radiance résulte de :

- la contribution de la radiation solaire totale (direct et diffuse) réfléchie par la surface et directement transmise au capteur exprimée par $e^{\frac{-\tau}{\mu_v}}$ avec $\mu_v = \cos(\theta_v)$
- la radiance atmosphérique intrinsèque exprimée en terme de réflectance par la fonction $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$
- la contribution de l'environnement qui réfléchit le flux total (direct+diffus) descendant, les photons atteignent le capteur par diffusion, on note cette nouvelle transmittance diffuse atmosphérique $t'_d(\theta_v)$

Ainsi, la réflectance apparente ρ^* au niveau du capteur peut être exprimée par :

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_t S} (\rho_t e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + \rho_t t'_d(\theta_v)) \quad (3.7)$$

Dans notre cas, les fonctions $t_d(\theta_s)$ et $t'_d(\theta_v)$ sont identiques en concordance avec le principe de reciprocité et ρ^* peut être réécrit :

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{\rho_t}{1 - \rho_t S} T(\theta_s) T(\theta_v) \quad (3.8)$$

avec $T(\theta_v) = e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + t_d(\theta_v)$

La fonction de l'environnement

Supposons à présent que la réflectance de la surface est non uniforme. Dans une première approche, on peut considérer une petite cible M de réflectance $\rho_c(M)$ avec un environnement uniforme de réflectance $\rho_e(M)$. Dans ce cas, l'équation 3.7 apparaît intéressante par son formalisme, elle donne le poids de chaque réflectance et ρ^* peut être maintenant écrit :

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_t S} (\rho_c(M) e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + \rho_e(M) t_d(\theta_v)) \quad (3.9)$$

Si nous considérons une structure irrégulière, nous gardons le même formalisme comme dans l'équation 3.9, nous avons seulement à définir une nouvelle réflectance d'environnement notée $\langle \rho(M) \rangle$ qui représente une moyenne spatiale de chaque pixel sur toute la surface :

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho(M) \rangle S} (\rho_c(M) e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + \langle \rho(M) \rangle t_d(\theta_v)) \quad (3.10)$$

Cette moyenne spatiale peut être pondérée par une fonction atmosphérique qui prend en compte l'efficacité d'un point M' selon la distance au point M, ainsi $\langle \rho(M) \rangle$ peut être donné par :

$$\langle \rho(M) \rangle = \frac{1}{t_d(\theta_v)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho'(x, y) e(x, y, \theta_v) dx dy \quad (3.11)$$

où M est l'origine du système de coordonnées, $\rho'(x, y)$ la réflectance au point M'(x,y), $e(x, y, \theta_v)$ la contribution de la transmission diffuse $t_d(\theta_v)$ par unité de surface d'une source isotropique placée en M'(x,y).

L'utilisation de la moyenne $\langle \rho(M) \rangle$ pour les ordres supérieurs d'interaction (dans la série géométrique) n'est pas correct mais raisonnable, parce que dans le plupart des cas, la contribution de ces termes n'excède pas 10-15% de la contribution du premier ordre.

Si on restreint le modèle dans le cas d'observations verticales (ou proche, $\theta_v < 30\%$), l'équation 3.11 peut s'écrire :

$$\langle \rho(M) \rangle = \frac{1}{t_d(\theta_v)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho'(r, \phi) r p(r) dr d\phi \quad (3.12)$$

avec

$$rp(r) = \frac{re(r, \phi, 0)}{t_d(0)} \quad (3.13)$$

où (r, ϕ) sont les coordonnées polaires d'un point de la surface donné, avec M le pixel à l'origine.

Actuellement, il est impossible de résoudre le problème exactement, en utilisant l'équation 3.12 à cause du temps de calcul. Généralement, on définit une taille caractéristique r de la cible où la réflectance est considérée uniforme. Par la même occasion, on peut calculer la réflectance de l'environnement ρ_e par une simple moyenne arithmétique et on estime $\langle \rho(M) \rangle$ de la manière suivante. Considérons une cible circulaire de rayon r de réflectance ρ_c entourée par une surface homogène de réflectance ρ_e , l'équation 3.12 devient :

$$\langle \rho(M) \rangle = \rho_c F(r) + (1 - F(r)) \rho_e \quad (3.14)$$

avec

$$F(r) = 2\pi \int_0^r r' p(r') dr' \quad (3.15)$$

qui donne la contribution relative à $\langle \rho(M) \rangle$ des points de surface d'une distance maximale r.

La réflectance atmosphérique intrinsèque

La réflectance atmosphérique intrinsèque observée, $\rho_r + \rho_a$ est écrite ici comme la somme de la contribution des aérosols et de Rayleigh. Cette décomposition n'est pas valide pour les petites longueurs d'ondes ($< 0.45\mu\text{m}$) ou pour de larges angles zénithaux du Soleil et de visée.

Rayleigh

- Réflectance atmosphérique :

Pour la diffusion isotropique, Chandrasekhar [1] a montré comment dériver les solutions pour des petites épaisseurs optiques jusqu'aux larges épaisseurs. Il exprime la réflectance atmosphérique $\rho^a(\mu_s, \mu_v, \phi_v - \phi_s)$ comme :

$$\rho^a(\mu_s, \mu_v, \phi_v - \phi_s) = \rho'_a(\mu_s, \mu_v, \phi_v - \phi_s) + (1 - e^{\frac{-\tau}{\mu_s}})(1 - e^{\frac{-\tau}{\mu_v}})\Delta(\tau) \quad (3.16)$$

où $\rho'_a(\mu_s, \mu_v, \phi_v - \phi_s)$ est la contribution de la diffusion simple et le second terme approxime les ordres plus élevés de diffusion.

- La fonction de transmission :

Elle se réfère au flux normalisé mesuré à la surface. Il y a plusieurs expressions approximées basées sur la méthode des deux flots pour calculer le flux transmis [17]. L'exactitude de ces expressions dépend des propriétés de diffusion des couches atmopshériques (nuages épais ou minces, ou aérosols) et des conditions géométriques. La méthode Delta-Eddington [18], a été prouvée la plus efficace et a été sélectionnée. Sachant que la diffusion moléculaire est conservatrice ($\omega_0 = 1$) et que le facteur d'anisotropie g est égal à zéro, on peut écrire :

$$T(\mu) = \frac{[2/3 + \mu] + [2/3 - \mu]e^{\frac{-\tau}{\mu}}}{4/3 + \tau} \quad (3.17)$$

où μ est le cosinus de l'angle zénithal solaire et/ou d'observation et τ est l'épaisseur optique.

- L'albédo sphérique :

Dans un cas de conservation comme pour la diffusion, l'albédo sphérique s est donnée par :

$$s = 1 - \int_0^1 \mu T(\mu) d\mu \quad (3.18)$$

où $T(\mu)$ est donné dans l'équation 3.17, en utilisant les équations 3.17 et 3.18, l'albédo sphérique peut s'écrire :

$$s = \frac{1}{4 + 3\tau} [3\tau - 4E_3(\tau) + 6E_4(\tau)] \quad (3.19)$$

où $E_3(\tau)$ et $E_4(\tau)$ sont les intégrales exponentielles de l'argument τ .

Les aérosols

Pour les aérosols, les paramètres de diffusion optique sont calculées en utilisant un modèle prédéfini : Continental, Maritime, Urbain, Stratosphérique, Désertique ou un modèle défini par l'utilisateur.

Les propriétés de diffusion de la couche d'aérosols sont calculées en utilisant l'approximation de Sobolev [15] pour la réflectance, Zdunkowsky et al. [19] pour la transmittance et une formule semi-empirique pour l'albédo sphérique ; cela permet d'avoir une approximation rapide sans avoir un temps de calcul important. Ces approximations peuvent être insuffisantes, notamment dans le cas d'une surface non homogène. C'est pourquoi, on calcule le système couplé aérosol+rayleigh par la méthode de la diffusion par ordres successifs ; avec une telle méthode on atteint une précision inférieure à 10^{-4} en unité de réflectance.

Simulation de l'élévation du capteur

On va s'intéresser ici au cas où le capteur est situé à l'intérieur de l'atmosphère, c'est à dire dans un avion. L'équation 3.8 devient :

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v, z) = T_g(\theta_s, \theta_v, z)[\rho_r(z) + \rho_a(z) + \frac{\rho_t}{1 - S(z)\rho_t} T(\theta_v, z)T(\theta_s, z)] \quad (3.20)$$

L'absorption gazeuse

Pour les ondes visibles, l'absorption due à l' O_3 sur le trajet cible-capteur n'est pas comptée, car les molécules sont généralement localisées au-dessus des avions. L'absorption de H_2O est très dépendante de l'altitude du capteur jusqu'à 4km.

La réflectance et la transmittance atmopshérique

Dans le plupart des cas, l'approximation par un "atmosphère équivalent" pour la réflectance et la transmittance atmosphérique est suffisante :

$$\rho(z) \simeq \rho_r(z = \infty, \tau_r(0 \rightarrow z)) \quad (3.21)$$

$$T(\tau_r, \theta_v, z) \simeq T(\tau_r(0 \rightarrow z), \theta_v, z = \infty) \quad (3.22)$$

Ce qui signifie que le calcul de l'épaisseur optique correspond à l'intégration entre la surface et le capteur.

La correction atmosphérique

On considère ici le sol comme une surface Lambertienne. La réflectance corrigée, notée ρ_{ac} est donnée par :

$$\rho_{ac}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \frac{\rho'_{ac}}{1 + \rho'_{ac}s} \quad (3.23)$$

avec

$$\rho'_{ac} = \frac{\frac{\rho_i^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{T_g} - \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{T(\theta_s)T(\theta_v)} \quad (3.24)$$

où ρ_i^* est la réflectance apparente.

3.2.3 Interaction entre les effets de diffusion et d'absorption.

La radiation atmosphérique dépend des transmittances gazeuses qui peuvent être modifiées par la contribution des gaz absorbants.

Si nous considérons l' O_3 , celui-ci est localisé aux altitudes où les molécules et les aérosols sont clairsemés, ainsi la radiation incidente et réfléchie passe à travers la couche d'ozone presque sans aucune diffusion. On peut alors calculer la radiation atmosphérique ρ^* sans prendre en compte l' O_3 . On modifie le signal avec seulement la transmittance directe, qui correspond au double chemin :

$$T_{g_{O_3}}(\theta_s, \theta_v, U_{O_3}) \quad (3.25)$$

où U_{O_3} est la concentration en ozone.

Dans le cas de l' H_2O et du CO_2 , les bandes d'absorption sont dans le proche et milieu infrarouge. Dans ces valeurs, la diffusion moléculaire devient négligeable et on peut prendre en compte seulement la diffusion des aérosols. Quelques simulateurs, pour obtenir des atmosphères réalistes, démontrent qu'au-delà de $0.85\mu m$ la première et seconde diffusion constituent quasiment la radiation diffuse totale. Parce que la fonction de phase des aérosols a une large diffusion directe, les chemins de la diffusion ne sont pas complètement séparés du chemin direct et on peut considérer que l'influence du CO_2 ou de l' H_2O sur le flux de diffusion est le même que le flux direct. Ainsi, les flux diffus et transmis peuvent être réduits par le facteur :

$$T_{g_{H_2O}}(\theta_s, \theta_v, U_{H_2O}) \quad (3.26)$$

Pour l' O_2 , l'absorption est très localisée et présente une petite bande, ainsi on prend en compte ce gaz de la même manière :

$$T_{g_{O_2}}(\theta_s, \theta_v, U_{O_2}) \quad (3.27)$$

Pour la réflectance atmosphérique, le problème est légèrement différent. Les chemins de la diffusion ne sont pas proches du chemin direct. Les photons sont dispersés aux angles larges, loin de la direction précédente. Pour l' O_3 la même approximation est justifiée parce que elle est basée sur la faible interaction entre les deux processus. Pour l' H_2O l'échelle de hauteur est comparable à celle des aérosols tant que le CO_2 est uniformément mélangé. Cependant, pour ces deux gaz, l'approximation n'est plus valable mais est suffisamment précise tant que l'absorption gazeuse est petite dans la fenêtre atmosphérique.

Pour avoir une précision maximale dans l'approximation, on considère 3 cas extrêmes : les vapeurs d'eau en dessus de la couche d'aérosols, les vapeurs d'eau sous la couche d'aérosols, et un cas intermédiaire où l'on considère que la moitié des vapeurs d'eau présente dans l'atmosphère absorbe la radiance du chemin des aérosols. Dans cette situation, le signal du capteur s'écrit :

$$\begin{aligned} & \rho_{TOA}^{i=1,3}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \\ &= T_g^{OG}(\theta_s, \theta_v)[\rho_R + (\rho_{R+A} - \rho_R)T_g^{H_2O}(\theta_s, \theta_v, \frac{i-1}{2}U_{H_2O}) + T \downarrow(\theta_s)T \uparrow(\theta_v)\frac{\rho_s}{1-S\rho_s}T_g^{H_2O}(\theta_s, \theta_v, U_{H_2O})] \end{aligned}$$

où T_g^{OG} fait référence à la transmittance gazeuse pour les autres gaz que les vapeurs d'eau, $T_g^{H_2O}$ est l'absorption de l'eau et $\rho_{R+A} - \rho_R$ est une estimation de la réflectance intrinsèque des aérosols. T_g^{OG} est calculé dans le chemin Soleil-cible-capteur en utilisant la formule suivante :

$$T_g^{OG}(\theta_s, \theta_v) = \prod_{i=1}^8 T_{gi}(\theta_s, \theta_v, U_i) \quad (3.28)$$

3.3 Le logiciel 6S

Le logiciel simule le signal du capteur entre $0.25\mu m$ et $0.40\mu m$ moyennant un atmosphère dépourvu de nuages. Rappelons la formule de la réflectance au niveau du capteur pour une surface lambertienne :

$$\rho'(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = t_g(\theta_s, \theta_v)\{\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho(M) \rangle S}[\rho_c(M)e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + \langle \rho(M) \rangle t_d(\theta_v)]\} \quad (3.29)$$

Ce formalisme prend en compte les principaux effets atmosphériques, l'absorption gazeuse, la diffusion par les aérosols et les molécules, et une surface non homogène.

Les paramètres suivants sont nécessaires pour initialiser la simulation (Figure B.1) :

les conditions géométriques : celles-ci sont définies par l'entrée directe des angles solaires et de visée radiométrique (zénithal et azimuthal), ainsi que la date

le modèle atmosphérique pour les composants gazeux : elle détermine l'absorption et la diffusion, on a le choix entre différents modèles prédéfinis (tropical, subarctique...) ou bien on peut entrer les données des contenus intégrés en vapeur d'eau et en ozone de l'atmosphère (exprimés respectivement en g/cm^2 et en $cm.atm$)

le modèle d'aérosols : on a le choix entre différents modèles prédéfini (continental, maritime...) ou bien on peut définir son propre modèle à partir des proportions des constituants possibles (poussières, particules océaniques...). On définit également le paramètre le plus important, la concentration des aérosols, soit à partir de la visibilité, soit à partir de l'épaisseur optique à 550 nanomètres

les conditions spectrales : on a le choix entre des conditions spectrales prédéfinies correspondant aux canaux des capteurs les plus usuels (Landsat, SPOT...) et la définition des conditions spectrales propres au capteur utilisé, avec la fonction filtre définie par intervalle de $0.005\mu\text{m}$

la réflectance au sol : la surface peut-être considérée homogène ou hétérogène, puis on définit les données suivant le cas considéré

A partir de ces données, on calcul les fonctions de diffusion, à 10 longueurs d'ondes distribuées sur le spectre solaire. A une longueur donnée on interpole à partir des valeurs précédentes en prenant en compte la dépendance spectrale.

En sortie, le logiciel 6S fournit les éléments suivants (Figures B.2 à B.4) :

- des valeurs intégrées de la réflectance apparente de la surface visée, de la luminance totale mesurée par le capteur et de la transmittance gazeuse
- les valeurs normalisées de l'irradiation solaire au niveau du sol et de la réflectance mesurée au niveau du capteur
- les valeurs absolues de l'irradiation au niveau du sol et des luminances au niveau du capteur
- la fonction filtre et l'éclairement solaire intégrés sur la bande spectrale considérée
- un jeu de paramètres de correction du voile atmosphérique

A partir de ces valeurs, on peut donc reconstituer l'évolution du signal de son entrée dans l'atmosphère à la surface et au capteur à bord de l'avion, ce qui constitue l'objectif souhaité.

Chapitre 4

Le géoréférencement des données

4.1 Introduction

Une fois le modèle atmosphérique défini, il faut dans une seconde étape géoréférencer les différentes données afin d'initialiser la calibration des images. Pour commencer, une présentation de la géodésie est nécessaire pour la compréhension des problèmes liés au géoréférencement, voir Annexe C. Nous observerons le référencement des images aériennes de l'IGN, puis celui des données du satellite MODIS.

4.2 Les images aériennes

4.2.1 Organisation des images de l'IGN

Lors des campagnes de prises de vue, la caméra numérique acquiert un ensemble d'images successives de la surface terrestre (Figure 4.1), cet ensemble formant un chantier. Les caractéristiques de celui-ci sont en général :

- une résolution variant de 20 à 80cm,
- un taux de recouvrement de 60%¹ suivant la direction Track²,
- un taux de recouvrement de 20% suivant la direction Scan³,
- une acquisition dans des conditions atmosphériques favorables (temps clair)
- plusieurs centaines voire milliers de prises de vues



FIG. 4.1 – Exemple d'image aérienne

¹Ce recouvrement est utilisé pour les travaux de stéréo restitution

²Track correspond à la direction d'évolution de l'avion

³Scan correspond à la direction normale à Track, soit dans le cas d'une barette CDD le sens de celle-ci

Les images sont sauvegardées au format tif, et sont accompagnées d'un fichier "ori" permettant d'obtenir un ensemble de métadonnées sur les conditions de la prise de vue : positionnement de l'avion, du Soleil, la focale de la caméra, etc... Ce fichier est indispensable pour géoréférencer les images.

4.2.2 L'orthophoto

Le terme d'orthophoto est utilisé pour désigner l'image aérienne géoréférencée dans un système de coordonnées planes et rectifiée par l'élimination des distorsions dues à la perspective de la prise de vue par l'avion et au terrain. Dans notre cas, le système utilisé est le Lambert avec l'utilisation du système géodésique NTF.

L'orthophoto est effectuée à partir de l'ensemble des images du chantier, et également avec le MNT (Modèle Numérique de Terrain) de la zone qui représente, sous forme numérique, le relief de celle-ci (Figures 4.2 et 4.3).

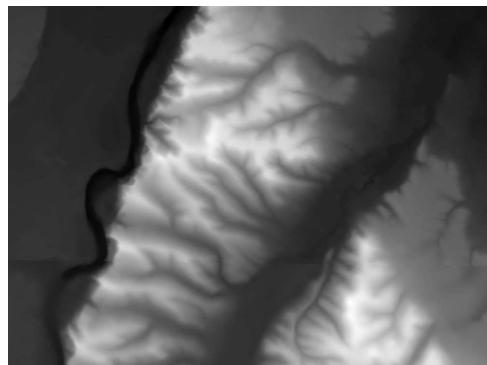


FIG. 4.2 – Exemple de MNT



FIG. 4.3 – Orthophoto d'un chantier au sud de Toulouse, à la résolution de 2m

A partir de cette orthophoto, on génère les images de chaque canal aux résolutions natives de MODIS, en incluant la FTM (Fonction de Transfert en Modulation) des capteurs de MODIS.

4.2.3 L'intégration de la FTM

Pour pouvoir superposer les images de l'IGN à celles de MODIS, il faut générer les images géoréférencées de chaque canal du chantier à la résolution de MODIS, c'est-à-dire 250m pour le rouge et 500m pour le vert et le bleu, tout en intégrant la FTM des capteurs de MODIS.

La FTM est une fonction permettant d'obtenir les courbes de netteté et de contraste d'un objectif optique. Ce type de courbe est notamment utilisé pour déterminer le pouvoir discriminateur d'un dispositif de reconnaissance visuelle. Dans notre cas, comme la plupart du temps, cette fonction est à noyau séparable, c'est-à-dire quelle peut se décomposer en deux fonctions indépendantes, l'une suivant le Scan et l'autre suivant le Track.

De nombreux modèles de FTM existent suivant la nature du capteur considéré. Pour notre étude, on a décidé de prendre le modèle le plus courant et relativement proche de la réalité, ainsi la fonction peut s'écrire, suivant une direction :

$$FTM(f) = |\sin(f)|^x \quad (4.1)$$

avec $x \in [1; +\infty]$ et où f représente la fréquence spatiale dans la direction donnée.

Pour pouvoir appliquer cette formule à une image, il faut passer dans le domaine spatial pour ainsi obtenir une nouvelle formule appelé PSF (Point Spread Function), or sachant que la FTM est séparable, on peut calculer les LSF (Line Spread Function) qui correspondent à la décomposition de la PSF :

$$LSF(t) = TF^{-1}[FTM(f)] \quad (4.2)$$

où t représente la dimension spatiale, dans une direction donnée.

Dans le cas idéal, x vaut 1 pour la FTM et celle-ci est simplement la valeur absolue du sinus cardinal. La LSF représente une porte de largeur égale à la résolution des détecteurs composant le capteur (Figure 4.4).

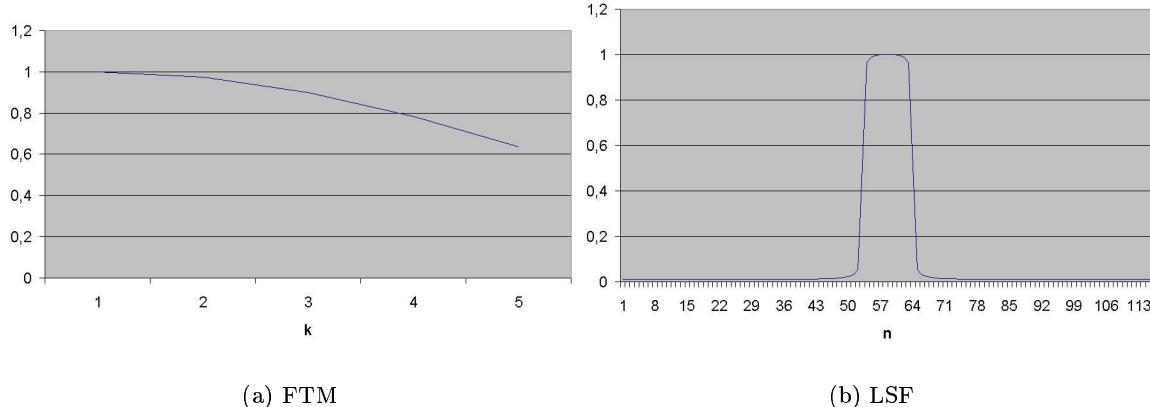


FIG. 4.4 – Cas idéal de la FTM

Les valeurs sont données pour les fréquences : $f = \frac{kF_N}{4}$ pour la FTM, et $t = \frac{n-60}{20F_N}$ pour la LSF ; où F_N est la fréquence de Nyquist : $F_N = \frac{1}{2D}$, avec D : résolution du détecteur.

Cependant, le cas idéal n'existe pas, ou rarement. De nombreux phénomènes interviennent dans la distribution de l'énergie sur les capteurs, il y a notamment :

Le système optique celui-ci est considéré comme étant un système à lumière incohérente, un facteur de la FTM est lié à la fonction caractéristique de l'ouverture pupillaire de l'instrument

Le système photo-électronique chaque détecteur élémentaire est un intégrateur de flux correspondant à une réponse impulsionnelle séparable, ce qui joue également dans la FTM

Le filé l'effet du filé est couplé avec l'intégration du détecteur, pendant l'échantillonnage le détecteur bouge

Pour le satellite MODIS les FTM ne sont pas idéales, car elles prennent en compte la dispersion de l'énergie autour des détecteurs. On dispose seulement de quatre valeurs pour chaque canal et direction (à des fréquences multiples de Nyquist), ainsi on procède tout d'abord à une interpolation avec la fonction 4.1 (on obtient pour x une valeur allant de 1.2 jusqu'à 1.8, en fonction des canaux), puis on réalise la transformée de Fourier inverse pour obtenir les LSF (Figure 4.5).

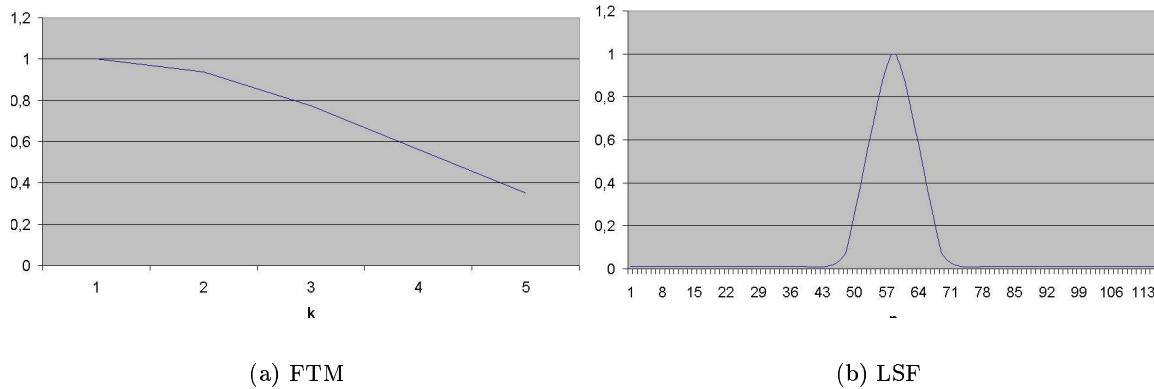


FIG. 4.5 – FTM du canal rouge de MODIS sur le Scan

La forme des LSF s'apparente à un triangle de largeur 2 fois supérieure à la résolution du détecteur, ce triangle est centré sur le milieu d'un détecteur. Cela signifie qu'une partie de l'énergie reçue par un détecteur déborde sur les détecteurs voisins.

Une fois les LSF calculés, on applique celles-ci sur l'orthophoto générée précédemment par convolution (Figure 4.6).

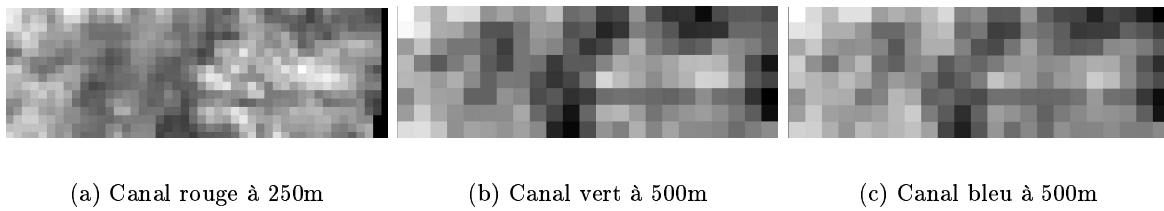


FIG. 4.6 – Images des canaux de l'ortho 4.3 incluant les LSF de MODIS

Il faut noter que cette procédure n'est pas rigoureuse, en effet, pour pouvoir superposer les images aériennes de l'IGN à celles de MODIS, il faudrait dans un premier temps déconvoluer ces images avec la FTM de la caméra numérique et ensuite convoluer les images résultantes avec la FTM de MODIS. Cependant, la forme spectrale de la FTM de la caméra n'étant pas connue et vu la complexité d'un processus de déconvolution, on ne peut procéder ainsi. Par ailleur, la différence de résolution entre les images aériennes et celles de MODIS étant très grande, il n'est pas nécessaire d'effectuer cette déconvolution. Alors on fait l'hypothèse que la FTM de la caméra numérique est relativement proche du cas idéal (c'est à dire d'un sinus cardinal en valeur absolue).

La dernière étape concernant les images aériennes de l'IGN est la génération d'une carte des conditions géométriques.

4.2.4 La carte des orientations

Le logiciel 6S nécessite un certain nombre de paramètres géométriques à l'initialisation (Voir 3.3), or les données demandés sont stockées dans le fichier ori des images et le MNT du chantier. On crée alors une carte des conditions géométriques sur l'ensemble du chantier regroupant les éléments suivants :

- l'angle solaire zénithal
- l'angle solaire azimuthal
- l'angle de visée zénithal
- l'angle de visée azimuthal
- l'élévation du terrain (MNT)
- l'altitude de l'avion, au moment de la prise de vue

Ces données sont exprimées en degré pour les angles, et en mètre pour les altitudes.

4.3 Les données MODIS

4.3.1 Présentation générale

Le spectroradiomètre MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) est l'élément clef à bord des satellites : Terra (EOS AM, lancé en 1999) et Aqua (EOS PM, lancé en 2002) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration)[10](Figure 4.7). Ces satellites voient entièrement la surface de la Terre, tous les 1 à 2 jours, acquérant des données dans 36 bandes spectrales. Ces données améliorent la compréhension de la dynamique mondiale et des processus agissant sur la Terre, les océans et l'atmosphère proche. MODIS joue un rôle vital dans le développement de système valide, global et interactif, modélisant la Terre, permettant de prévoir des changement globaux suffisamment précis pour assister les gouvernements dans la protection de l'environnement.

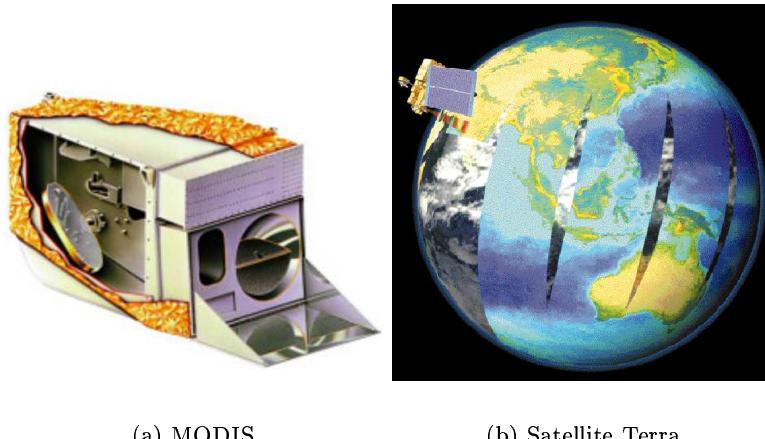


FIG. 4.7 – Présentation MODIS

Les instruments de MODIS offrent une haute sensibilité radiométrique (12 bits), dans les longueurs d'onde allant de $0.4\mu\text{m}$ à $14.385\mu\text{m}$. Deux bandes sont imageries à la résolution nominale de 250m au nadir, 5 bandes à 500m et les 29 autres à 1km (cf Annexe D.1).

Les données MODIS disponibles sont regroupées au sein de produits suivant leur nature et leur niveau de traitement.

4.3.2 Les produits

Les données MODIS sont classées dans des fichiers hiérarchiques possédant une structure pyramidale. Ce format de fichier est nommé HDF-EOS, pour Hierarchical Data Format Earth Observing System, il a été spécialement conçu pour faciliter les échanges, l'analyse, et l'archivage de données scientifiques [6].

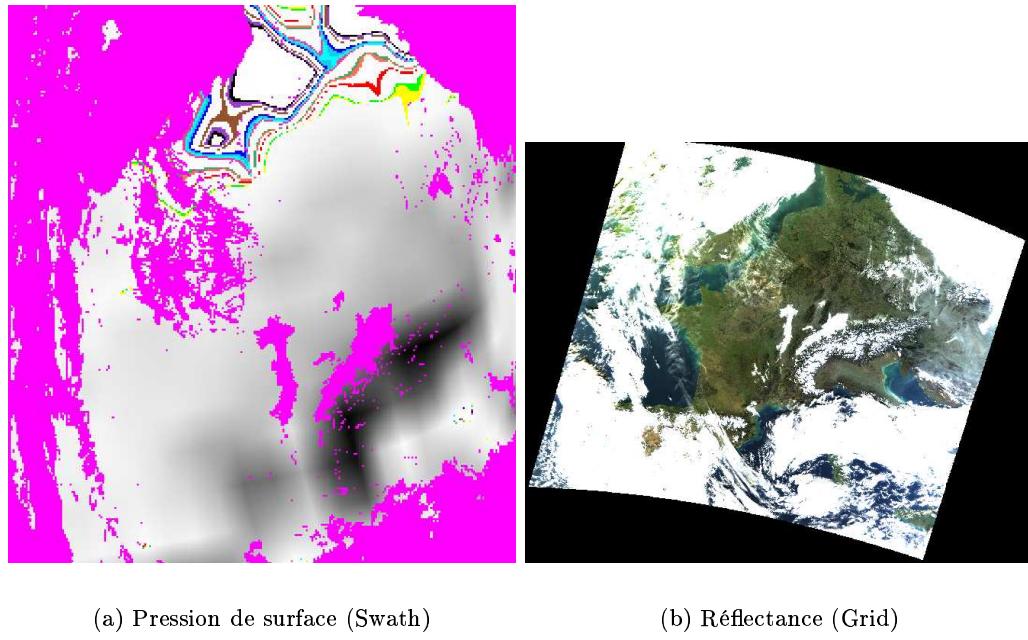


FIG. 4.8 – Exemple de produits MODIS, au niveau de la France

Les données sont organisées suivant leur nature (Figure 4.8) : atmosphérique (aérosols, masque de nuages, vapeurs d'eau...), calibration (géolocalisation, radiance calibrée...), terrestre (reflectance, indice de végétation...), et océanique (température de surface, ...). Et elles sont également ordonnées selon leur niveau de traitement : données brutes, calibrées, physiques, extrapolées... (Annexe D.2). Afin de réperer ces différences, les fichiers ont des noms standardisés :

XXXXXXXX.AYYYYDDD.HHMM.VVV.YYYYDDDHHMMSS.hdf

XXXXXXXX Les trois premières lettres indiquent le nom du satellite : MOD pour Terra, et MYD pour Aqua. Les lettres restantes spécifient le type de produit

A Date d'acquisition

YYYYDDD Année(YYYY), et jour(DDD) d'acquisition en julien⁴

HHMM Heure(HH) et minute(MM) du début d'acquisition

VVV Version de la collection à laquelle appartient le produit

YYYYDDDHHMMSS Date et heure de traitement

hdf Suffixe précisant le type de fichier

Exemple : MOD021KM.A2003173.1145.004.2003314222247.hdf

⁴Date julienne : durée écoulée depuis le 1 janvier - 4712 à 12 h, origine de la période julienne. On l'exprime en jour et fraction de jour

Ce fichier a été généré par des données issues du satellite Terra(MOD), il contient des données de calibration(02) à la résolution de 1km(1KM). Les données ont été acquises le 173 jour julien de l'année 2003, à partir de 11h45. Ce produit est contenu dans la collection version 4, et il a été généré le 314 jour julien de 2003, à 22h22m47s.

Il existe deux types de données MODIS :

- les données fauchées (ou Swath), ces données sont celles issues directement des capteurs du satellite
- les données ordonnées suivant une grille d'échantillonnage (ou Grid), ces données sont des données Swath rééchantillonnées suivant une grille de géoréférence

Les données Grid sont données dans une projection particulière, la projection sinusoïdale, ou projection Sanson-Flamsteed. Il s'agit d'un cas particulier de la projection de Bonne. Cette projection est utilisée pour une représentation globale de la planète. Elle conserve les surfaces et d'autres part les pôles sont moins déformés que dans le cas d'une projection cylindrique. Les déformations sont minimales autour de l'équateur et du méridien central (Figure 4.9).

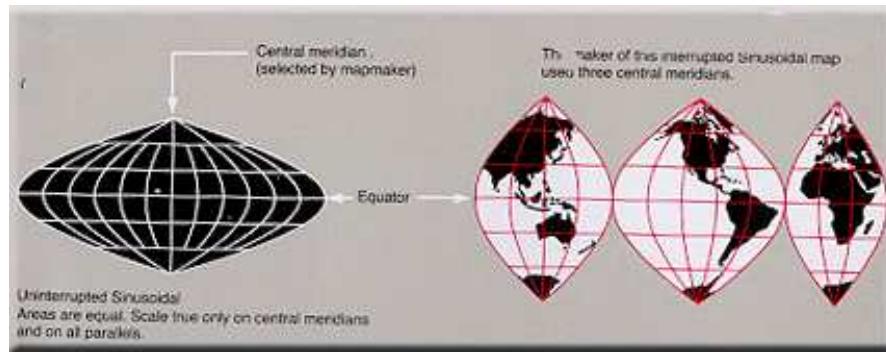


FIG. 4.9 – Projection sinusoïdale

4.3.3 La reprojection des données

Quelques outils sont mis à la disposition de la communauté scientifique pour effectuer le géoréférencement des données MODIS. Cependant sachant que ces outils sont, pour la plupart, développés par la NASA, ils n'intègrent pas les références françaises. Il a donc été nécessaire de modifier ces outils pour intégrer ces normes. Pour effectuer la reprojection, un certain nombre de paramètres est nécessaire :

- Nom du fichier en entrée : précise le fichier MODIS (hdf)
- Nom du fichier en sortie : image résultante, ainsi que son type (tif ou hdf)
- Nom des données : indique le type de données à projeter, exemple l'épaisseur optique, ainsi que les canaux associés
- L'emprise : correspond à la zone du territoire à projeter⁵
- Le type de projection : plusieurs types de projections sont disponibles (Lambert Conique Conforme, UTM...)
- Les paramètres de projection : ces paramètres sont liés au système géodésique en sortie
- Le datum : précise le décalage entre les ellipsoïdes de sortie et d'entrée
- L'interpolation : trois interpolateurs sont proposés : Plus proche voisin, Bilinéaire, et Bicubique
- La résolution : précise la résolution de l'image en sortie

⁵L'emprise est celle correspondante au chantier à traiter

On doit noter que les produits MODIS utilisés doivent contenir la zone correspondante au chantier à traiter avec une date d'acquisition proche de celle du chantier. Or, il s'avère que le satellite MODIS passe sur le territoire français chaque jour vers 12h, et les campagnes de prises de vue de l'IGN s'effectue également vers 12h, ceci nous permet d'obtenir des données atmosphériques proche de l'heure des prises de vue. Pour initialiser le logiciel 6S, nous avons besoin de l'épaisseur optique à 550nm, les valeurs intégrés en vapeur d'eau et ozone, et la réflectance au sol.

La réflectance

Les données de réflectance issues de MODIS sont de type Grid, elles sont données à la résolution nominale des capteurs : 250m pour le rouge, et 500m pour le vert et le bleu, et sont contenues dans le MOD09[12].

Pour réaliser le géoréférencement de ces données on a utilisé l'outil MRT (MODIS Reprojection Toolkit)[13]. Cet outil permet de reprojeter les données en Lambert Conique Conforme suivant le système NTF, cependant il n'intègre pas le datum NTF qui correspond au décalage entre les deux ellipsoïdes (Annexe C). On a donc modifié MRT de façon à avoir une reprojection précise, incluant le datum (Figure 4.10).

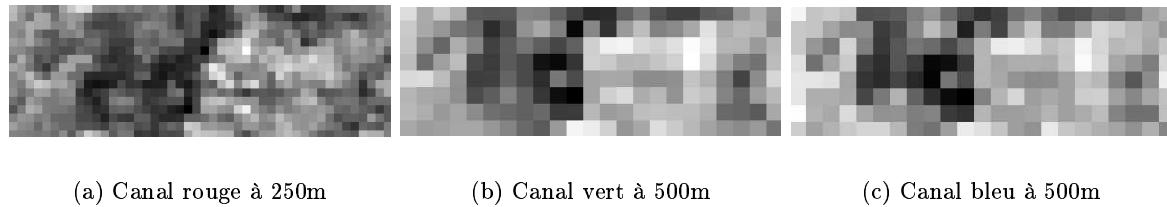


FIG. 4.10 – Images des canaux de MODIS reprojetées en Lambert NTF (réflectance)

Pour vérifier les résultats de la reprojection, il suffit de comparer ces images à celles issues de l'orthophoto (Figure 4.6) ; on voit que les images prises par paires sont proches, ce qui nous permet de conclure à une bonne reprojection. La différence entre les paires d'images réside dans le fait que la réflectance de MODIS est calibrée contrairement à nos images aériennes, la différence que l'on observe est le voile atmosphérique.

Les données atmosphériques

Pour les données atmosphériques (l'épaisseur optique (MOD04_L2), les vapeurs d'eau, et l'ozone (MOD07_L2))[11], le processus de reprojection adopté est différent. En effet, ces données étant de type Swath, dans un premier temps nous avions pensé utiliser l'outil MRTSwath (MODIS Reprojection Swath Tool)[14], mais cet outil ne gère que les données dans les résolutions nominales de MODIS (250, 500, et 1000m). Or, les données atmosphériques ne sont pas dans ces résolutions. On a pour l'épaisseur optique une résolution de 10km, et une résolution de 5km pour les vapeurs d'eau et l'ozone. Il a donc été nécessaire de rechercher une autre solution. Celle qui a été adoptée est l'utilisation combinée de l'outil HEG (HDF-EOS To GeoTiff Conversion Tool)[7] et de MRT. HEG est un outil un peu plus complet que MRT et MRTSwath, et permet de reprojeter les données Swath et Grid quelles que soient leur résolution. Néanmoins, HEG comme les autres outils, n'intègre pas le datum NTF, et de plus, cet outil n'est pas en open source, il était donc impossible de modifier celui-ci. Alors, pour essayer d'être au plus proche de la réalité, on a décidé de reprojeter les données dans le système UTM avec le datum WGS84, avec HEG, puis on projette les données résultantes, avec MRT en Lambert NTF et en appliquant le bon datum.

Pour vérifier que la reprojection est bonne, on a utilisé un autre produit de MODIS fournissant le radiance calibrée, qui est de type Swath également. On reprojette les données de la radiance dans les canaux rouge, vert, et bleu, puis l'on compare ceux-ci à ceux issus de l'orthophoto (Figures 4.6 et 4.11).

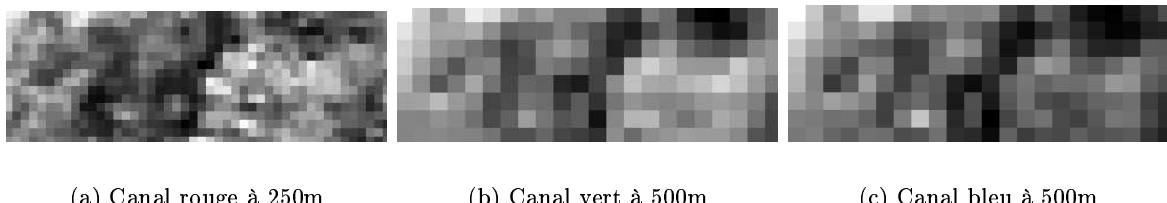


FIG. 4.11 – Images des canaux de MODIS reprojetées en Lambert NTF (radiance)

Le type d'interpolation

Pendant la reprojection, il est nécessaire d'interpoler les données pour les référencer dans le nouveau système. Le type d'interpolation tient un rôle important lors de la reprojection des données MODIS car les résultats de la reprojection sont très différents d'un type à un autre (Figure 4.12, canal bleu de MODIS (en reflectance), de résolution nominale 500m, reprojetées en Lambert NTF, à une résolution de 250m).

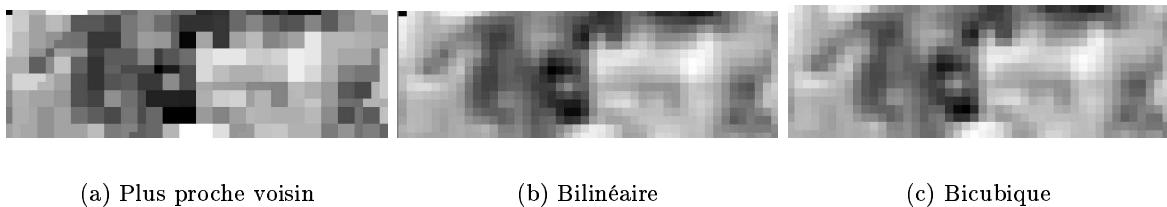


FIG. 4.12 – Effets du choix de l'interpolateur

On observe sur les images (Figure 4.12) des écarts importants entre les différents interpolateurs : l'interpolateur plus proche voisin est le moins performant des trois, pour les deux autres, leur performance se vaut avec néanmoins des résultats légèrement meilleurs pour le bicubique.

Pour les données de réflectance, on utilise l'interpolateur bicubique, qui offre les meilleures performances. Mais, pour les données atmosphériques, le choix est plus difficile, en effet lors du calcul de celles-ci, de nombreux tests sont effectués (détection de la présence éventuel de nuages, qualité des données en entrée, etc...) afin d'obtenir des résultats les plus précis possible, et permettant de décider si les données sont calculables ou pas. Par conséquent, il arrive parfois que suite aux tests, une région ne possède pas de données atmosphériques, ceci se traduit par des valeurs par défaut sur cette région (valeurs négatives). Les données atmosphériques sont reprojetées par HEG (Swath -> Grid (UTM(WGS84)) puis par MRT (Grid (UTM(WGS84) -> Grid (LCC(NTF))), elles subissent donc deux interpolations successives.

Pour HEG, il faut noter que seule l'interpolation par plus proche voisin est autorisée sur les données de type Swath. De plus, selon la documentation de HEG, cet outil gère les données manquantes lors de l'interpolation, c'est à dire qu'il ne propage les valeurs par défaut (négatives) pendant celle-ci. Ainsi, on utilise l'interpolateur plus proche voisin avec HEG. Ensuite pour MRT, la gestion des valeurs manquantes n'est pas effectuée, on choisit donc également l'interpolateur plus proche voisin.

Une fois que le géoréférencement des données est effectué, il ne reste plus qu'à réaliser la calibration, à l'aide de 6S.

Chapitre 5

Mise en oeuvre de la calibration et résultats

5.1 Introduction

Après le géoréférencement des données, il nous reste plus qu'à calculer la calibration et corriger les images aériennes. Dans ce chapitre, nous allons observer les différents résultats de la calibration sur une région située au sud de Paris, là où les conditions atmosphériques sont très variables dans l'espace (Figure 5.1)¹.



FIG. 5.1 – Orthophoto de la région située au sud de Paris, à la résolution de 10m

Les prises de vues ont été réalisées le 21 juin 2003 dans la matinée, on récupère alors les données MODIS générées à la même date sur cette zone.

¹La tendance bleutée de l'image correspond au voile atmosphérique, qui se situe principalement dans le canal bleu

5.2 Coefficient de calibration absolu

La première étape consiste à initialiser 6S : on parcourt donc chaque image de réflectance de MODIS géoréférencée et on initialise 6S avec les différentes données atmosphériques, géométriques, spectrales et radiométrique de la zone correspondante (Voir section 3.3, et figure 5.2) :

les conditions géométriques : celles-ci sont définies par la carte des orientations

le modèle atmosphérique : on entre les données des contenus intégrés en vapeur d'eau et en ozone (exprimés respectivement en g/cm^2 et en cm.atm) issues des produits MODIS

le modèle d'aérosols : on choisit le modèle prédéfini continental. On définit également la concentration des aérosols à partir de l'épaisseur optique à 550nm issue de MODIS

les conditions spectrales : on définit nous même les réponses spectrales des différents canaux de la caméra numérique par intervalle de $0.005\mu m$ (Figure 5.3)²

le réflectance au sol : la surface est considérée hétérogène ; on définit la réflectance au niveau du pixel, puis la réflectance de l'environnement (on calcule simplement la moyenne sur l'image)

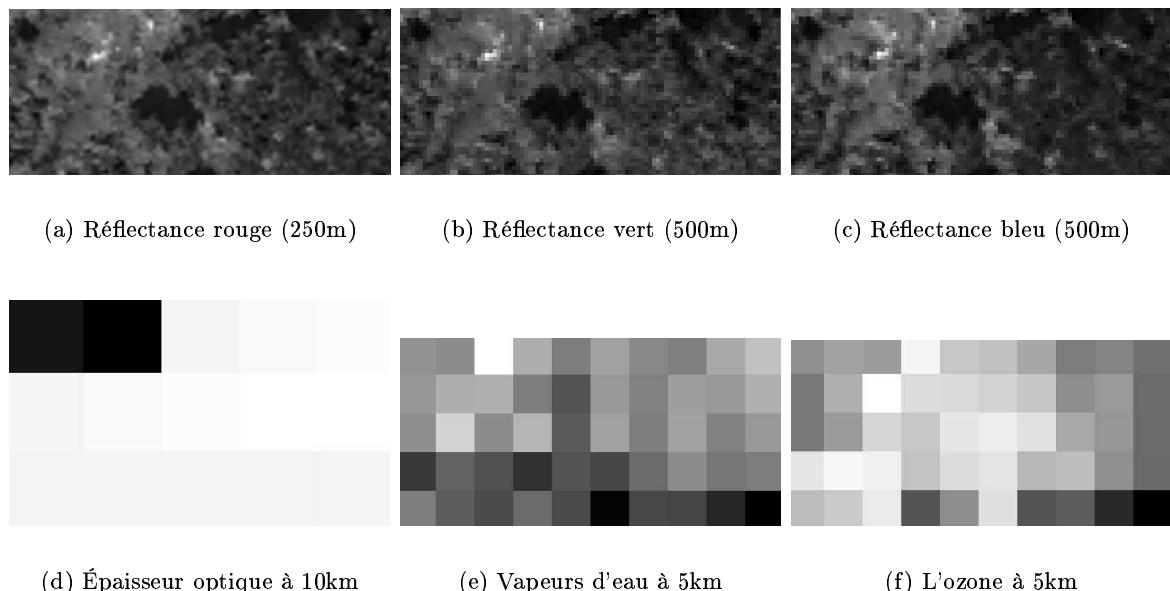


FIG. 5.2 – Images des données MODIS reprojetées en Lambert NTF, sur la zone sud de Paris

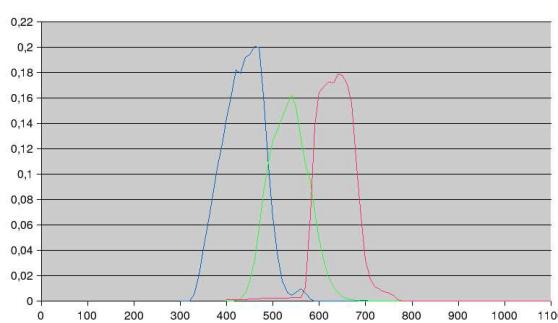


FIG. 5.3 – Réponses spectrales des canaux de la caméra

²Les fréquences sont données en nanomètres

Cette initialisation permet de calculer le modèle atmosphérique et l'équation de transfert radiatif pour réaliser la simulation du signal du capteur. Ainsi, on obtient la radiance au niveau de l'avion, qui est l'équivalent (en grandeurs physiques) des comptes numériques des images aériennes. Puis on calcule le coefficient de régression reliant les comptes numériques des images aériennes (Figure 5.4) aux grandeurs physiques simulées ; ce coefficient correspond au coefficient de calibration absolue approché.



(a) Canal rouge à 250m

(b) Canal vert à 500m

(c) Canal bleu à 500m

FIG. 5.4 – Images des canaux de l'ortho (Figure 5.1), sur la zone sud de Paris

Les données atmosphériques étant parfois manquantes (Voir section 4.3.3), lorsque c'est le cas pendant l'initialisation de 6S, on procéde par moyennage des données atmosphériques entourant la région³.

5.2.1 La régression linéaire

Plusieurs estimateurs sont disponibles pour calculer le coefficient de régression : norme L1, L2, Lp, Tukey... (Annexe E). Nous avons décidé de prendre l'estimateur de norme L2 car celui-ci donne une estimation fiable et rapide. On cherche à exprimer la relation entre les deux variables x et y :

- x est la variable explicative (ou indépendante) : radiance au niveau de l'avion. Les valeurs de x sont fixées par la simulation de 6S et sont supposés sans erreur
 - y est la variable expliquée (ou dépendante) : valeur numérique, issue des images aériennes de l'IGN. Les valeurs de y sont entachées d'une erreur de quantification

La droite de régression calculée est du type : $y = Ax$, où A est le coefficient de régression ; ce choix est justifié par le fait que lors de la quantification des images aériennes les valeurs nulles correspondent à l'absence de signal, c'est à dire aucune radiation perçu par la caméra. Du fait de l'erreur sur y, les points expérimentaux, de coordonnées (x_k, y_k) , ne se situent pas exactement sur la droite. On va donc chercher l'équation de la droite qui passe le plus proche possible de ces points.

La norme L2 consiste à chercher la valeur du paramètre A qui rend minimale la somme des carrés des écarts résiduelle (SS_r) entre les valeurs y_k et les valeurs calculées de y :

$$SS_r = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (5.1)$$

où n est le nombre de points, et $\hat{y}_k = Ax_k$, d'où :

$$SS_r = \sum_{k=1}^n (y_k - Ax_k)^2 \quad (5.2)$$

³On observe sur l'image de l'épaisseur optique (Figure 5.2) que les données ne sont pas disponibles en haut à gauche (zone noire)

Cette relation fait apparaître la somme des carrés des écarts comme une fonction de paramètre A. Lorsque cette fonction est minimale, la dérivée par rapport à A s'annule :

$$\frac{dSS_r}{dA} = -2 \sum_{k=1}^n x_k(y_k - Ax_k) = 0 \quad (5.3)$$

soit :

$$A = \frac{\sum_{k=1}^n x_k y_k}{\sum_{k=1}^n x_k} \quad (5.4)$$

Une fois l'équation définie, il ne reste plus qu'à calculer le coefficient.

5.2.2 Les résultats

Les valeurs des coefficients de calibration varient en fonction des conditions atmosphériques, et également de la calibration de la caméra lors de la prise de vue (cette calibration étant inconnue), typiquement les valeurs varient de 0.1 à $0.8 W/m^2/sr$. Pour la région étudiée, les coefficients sont égaux à (Figure 5.5, en bleu couples de données et en rose la droite de régression) :

- 0.443332, pour le canal rouge
- 0.589648, pour le canal vert
- 0.46181, pour le canal bleu

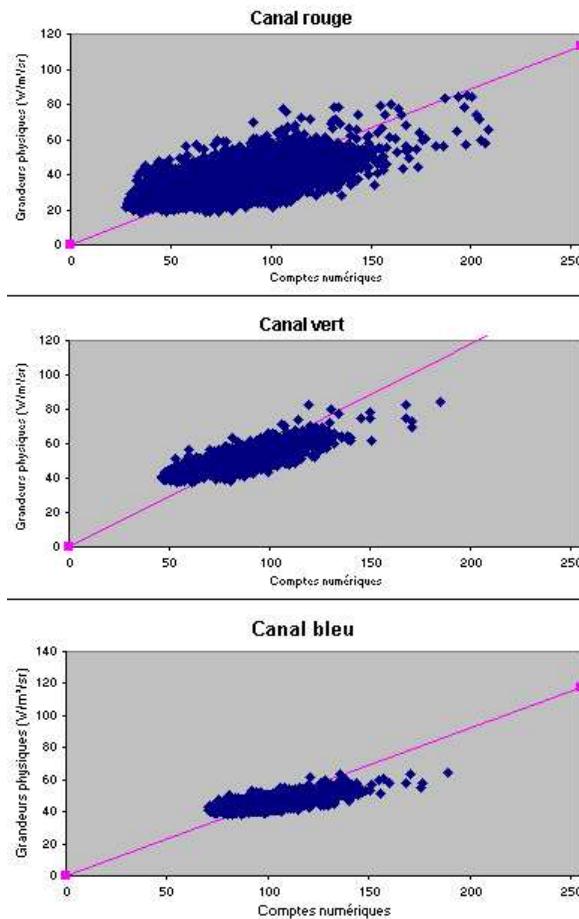


FIG. 5.5 – Droites de régression linéaire

Ainsi, on peut transformer les images aériennes des comptes numériques en grandeurs physiques ($W/m^2/sr$), à l'aide de ces coefficients, les images sont alors calibrées (Figure 5.6).

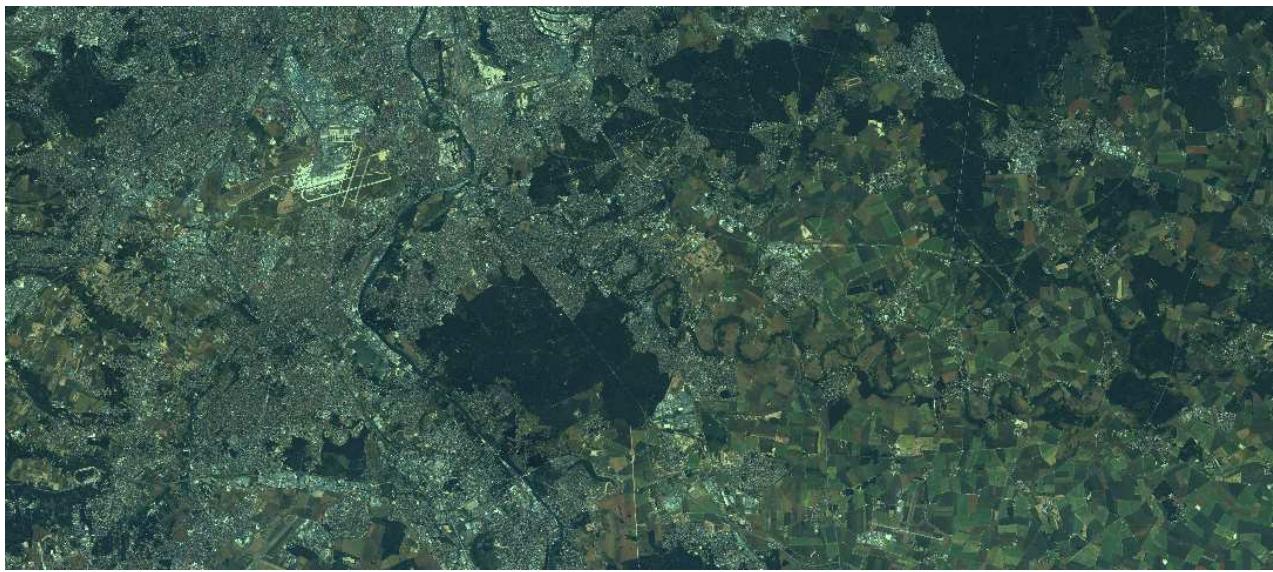


FIG. 5.6 – Orthophoto (Figure 5.1) calibrée

Une interrogation demeure sur cette calibration, celle de la direction du nuage de points (Figure 5.5). Lorsqu'on observe les graphiques de près, on observe que les nuages de points ont tendance à ne pas passer par l'origine, contrairement à notre hypothèse sur la quantification des images aériennes. La raison de ce phénomène reste sans réponse pour l'instant, cependant il existe quelques pistes notamment le fait que les réponses spectrales des capteurs de MODIS sont très fines contrairement à celles de la caméra de l'IGN (cf Annexe D.1 et figure 5.3), et il y a également la balance des blancs dans les images MODIS qui semble être faite de manière particulière.

Durant la simulation, on récupère également le jeux de paramètres de correction, pour procéder par la suite à la correction atmosphérique par inversion de l'équation de transfert.

5.3 Correction atmosphérique

5.3.1 Description

Les corrections atmosphériques s'effectuent à l'aide de 3 paramètres issus de la simulation de 6S : x_a , x_b , et x_c . L'équation de correction est la suivante :

$$y = x_a rad - x_b \quad (5.5)$$

$$ref = \frac{y}{1 + x_c y} \quad (5.6)$$

où rad est la radiance mesurée au niveau de l'avion, et ref la réflectance corrigée.

5.3.2 Les résultats

Nous allons montrer ici les résultats de la correction atmosphérique sur l'ensemble du chantier, c'est à dire sur l'orthophoto.

Les paramètres de correction sont appliqués sur l'orthophoto transformée en grandeurs physiques, à l'aide des coefficients de calibration, ainsi on obtient une nouvelle image qui correspond à la réflectance au sol calibrée et corrigée (Figure 5.7).

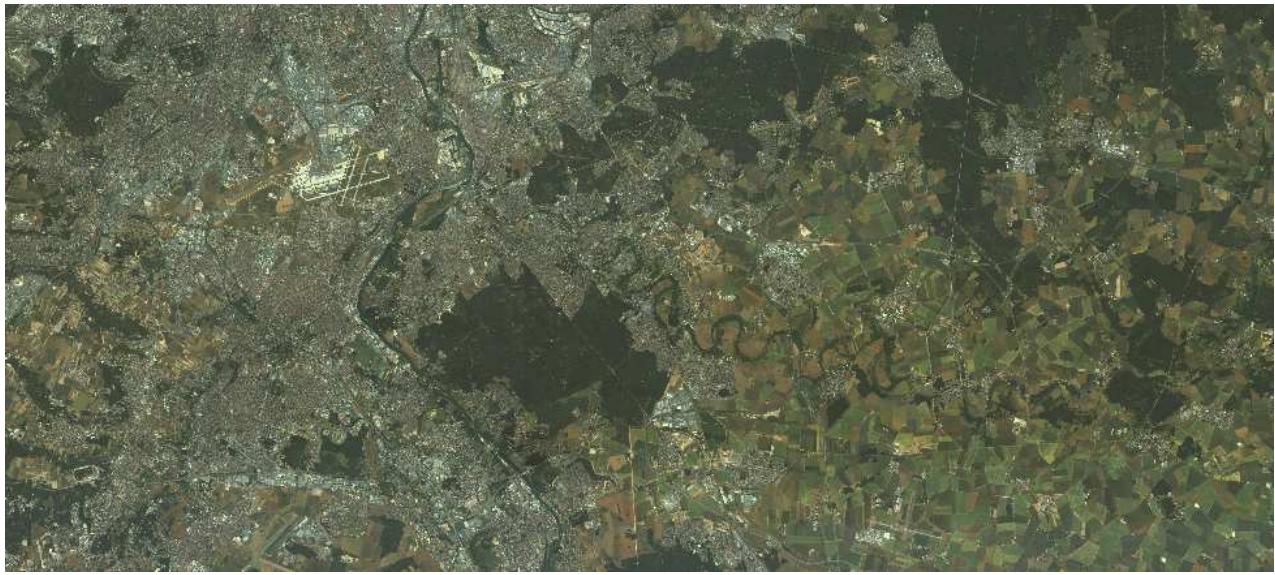


FIG. 5.7 – Orthophoto corrigée

Les moyens de vérifier la qualité des résultats sont faibles, cependant on peut vérifier sur l'image résultante s'il n'y a pas de saturation, la saturation correspond à des valeurs négatives de réflectance, elle est due à une soustraction trop importante du voile (Figure 5.8 et Tableau 5.9)⁴. Les causes peuvent être diverses pour cette saturation, cela peut venir d'une mauvaise qualité des données atmosphériques, du calcul du coefficient de calibration, etc... Il faut noter que les zones de saturation se situent principalement dans des zones d'ombres, typiquement des forêts ou des cours d'eau, là où la réflectance est faible.

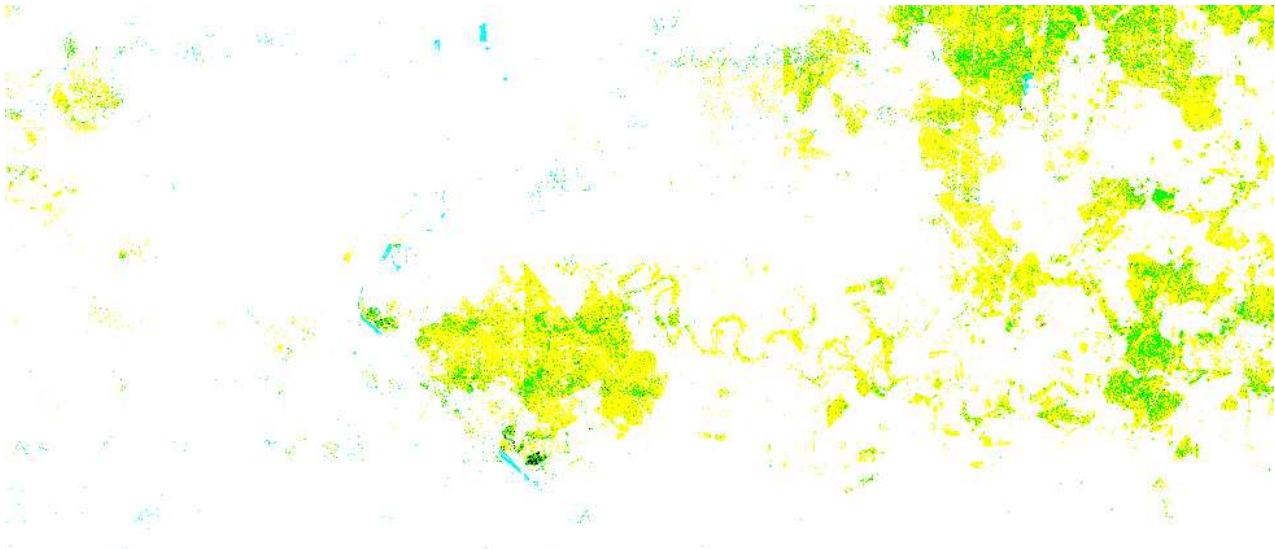


FIG. 5.8 – Saturation dans l'orthophoto corrigée

⁴Les zones blanches correspondent à une bonne calibration (sans saturation), les zones colorées sont saturées

	% de saturation
Canal rouge	2.2854
Canal vert	0.0222
Canal bleu	12.477

FIG. 5.9 – Pourcentages de saturation dans les canaux de l'image 5.1

On observe sur l'image des saturations (Figure 5.8) de nombreuses zones saturées, elles sont notamment dues au fait que le principal facteur intervenant dans les paramètres de correction est l'épaisseur optique or cette donnée est à la résolution de 10km. Cette résolution est très faible et ne permet pas d'avoir une bonne description de la composition en aérosols du chantier.

Une autre méthode de vérification consiste à comparer les moyennes de chaque canal de réflectance de l'orthophoto corrigée à celles des produits de réflectance MODIS. La réflectance de MODIS étant calibrée, les valeurs des moyennes de l'orthophoto doivent être proches de celle de MODIS (Figure 5.10).

	MODIS	Orthophoto	Erreur relative (%)
Canal rouge	0.0607097	0.0550846	9.265
Canal vert	0.0680824	0.0636002	6.583
Canal bleu	0.0332292	0.0305296	8.124

FIG. 5.10 – Moyennes des réflectances

On peut également observer l'histogramme des images pour vérifier l'efficacité du processus. En effet, le voile atmosphérique s'apparente dans l'histogramme à un décalage par rapport à l'origine des différents canaux (Figure 5.11(a)).

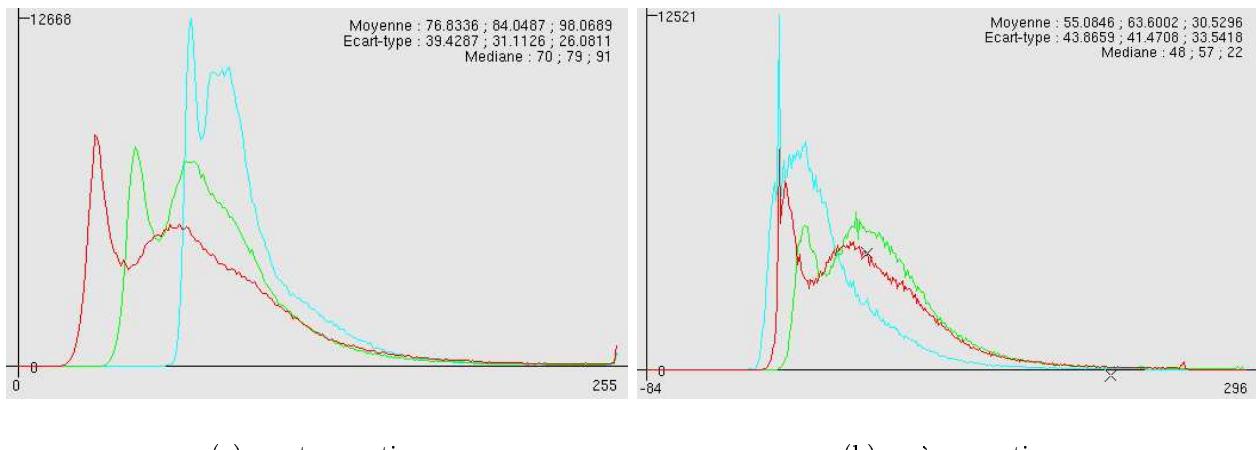


FIG. 5.11 – Histogrammes de l'ortho avant et après correction

On observe sur l'histogramme de l'orthophoto corrigée (Figure 5.11(b))⁵ que les canaux commencent quasiment à zéro. On a un offset de : -0.016 pour le rouge, -0.01 pour le vert, et -0.025 pour le bleu.

⁵Les valeurs de réflectance sont données avec un facteur 1000

Le fait que le canal bleu soit plus décalé vers les valeurs négatives que les autres canaux est dû au phénomène de saturation, en effet le voile atmosphérique se situe principalement dans le bleu.

Nous allons voir dans quelle mesure on peut améliorer les résultats.

5.4 Améliorations du processus

5.4.1 Reprojection des données atmosphériques

Lors de la reprojection des produits MODIS, les outils de reprojection permettent de choisir la résolution à laquelle l'on désire avoir les données reprojectées, moyennant une interpolation des valeurs. Pour essayer d'améliorer la correction, on reprojette l'épaisseur optique à 1km (soit une résolution dix fois supérieure à celle originale) en utilisant un interpolateur bilinéaire (l'utilisation de cet interpolateur permet d'améliorer la résolution, tout en minimisant les erreurs dues aux données manquantes). On reprojette également les données d'ozone et de vapeurs d'eau à la résolution de 1km (Figure 5.12).

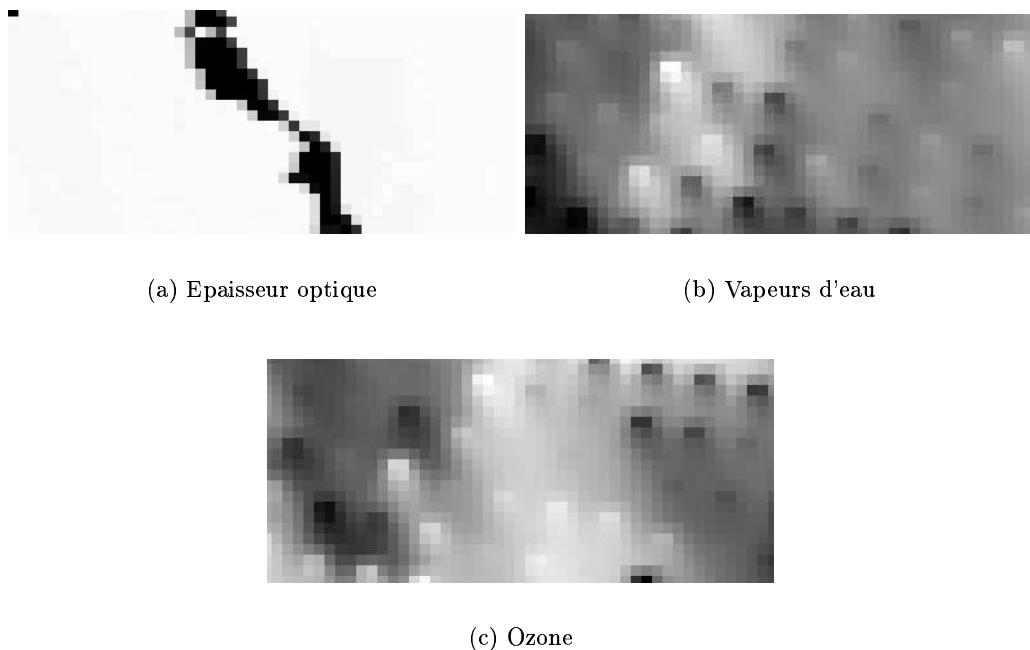


FIG. 5.12 – Données atmosphériques à 1km

Les nouveaux coefficients de calibration sont égaux à :

- 0.428122, pour le canal rouge
- 0.568405, pour le canal vert
- 0.431495, pour le canal bleu



FIG. 5.13 – Ortho corrigée, avec une épaisseur optique à 1km



FIG. 5.14 – Saturation de l'ortho corrigée, avec une épaisseur optique à 1km

On observe sur les images (Figures 5.13 et 5.14) que la calibration effectuée avec une épaisseur optique à 1km améliore sensiblement les résultats, les zones de saturations sur le chantier sont moins nombreuses (Tableau 5.15), les cours d'eau ne sont plus saturés. Mais néanmoins ces effets sont toujours présents, principalement sur les zones boisées.

	% de saturation
Canal rouge	1.5889
Canal vert	0.0105
Canal bleu	11.039

FIG. 5.15 – Pourcentages de saturation dans les canaux de l'image 5.13

Les moyennes des canaux en réflectance sont légèrement améliorées (Figure 5.16). A noter qu'étant données les résolutions des images de réflectance MODIS (250 pour le rouge, et 500m pour le vert et le bleu) et celle de l'orthophoto (10m), il est normal d'observer un biais entre les moyennes.

	MODIS	Orthophoto	Erreur relative (%)
Canal rouge	0.0607097	0.056538	6.871
Canal vert	0.0680824	0.064747	4.898
Canal bleu	0.0332292	0.031137	6.296

FIG. 5.16 – Moyennes des réflectances

L'histogramme est également amélioré (Figure 5.17), on a un offset de : -0.012 pour le rouge, -0.006 pour le vert, et -0.0028 pour le bleu. Cependant, on observe une dégradation de la forme des canaux, celle-ci est moins douce.

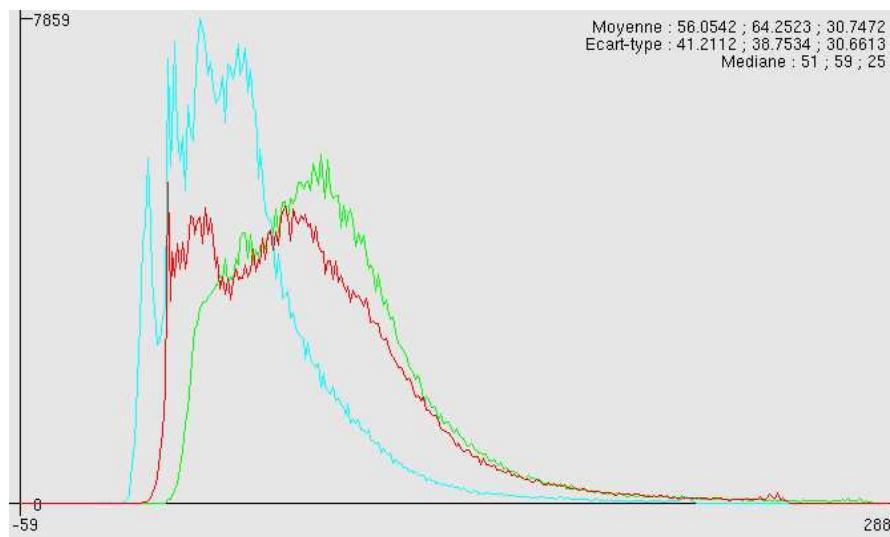


FIG. 5.17 – Histogramme de l'orthophoto corrigée, avec l'épaisseur optique à 1km

Les résultats issus de la reprojection des données atmosphériques à une résolution d'un kilomètre sont appréciables mais les zones de saturations sont toujours présentes.

5.4.2 Génération de l'épaisseur optique à 1km

Lors de la production de la réflectance de MODIS, le processus nommé PGE11 effectue une correction atmosphérique afin d'obtenir une réflectance calibrée. Pour réaliser cette correction, ce processus génère l'épaisseur optique dans les bandes 1, 3 et 8 (cf Annexe D.1) à 1km, mais ces données ne sont pas diffusées aux utilisateurs. Ainsi, on a cherché à utiliser ce processus afin de récupérer ces données pour ensuite calculer l'épaisseur optique à 550nm, par interpolation avec une résolution nominale de 1km.

PGE11 utilise les produits : MOD02 (à 1km, 500m et 250m), MOD03 (géolocalisation), et le MOD35 (masque de nuages). Il a besoin également de données atmosphériques dans des formats spécifiques.

La première idée fût de récupérer la portion de code correspondant aux calculs des épaisseurs optiques et de l'adapter en utilisant des fonctions du noyau. Mais, vu la complexité du code et le manque de commentaires, cette idée a été mise de coté. Nous avons tenté d'utiliser directement PGE11, et on a alors découvert qu'un laboratoire australien utilisait ce programme, et qu'il l'avait simplifié, adapté et commenté pour une utilisation plus aisée. Après la résolution de nombreux problèmes lors de la tentative de compilation (librairies, espace mémoire, ...), nous sommes parvenus à utiliser PGE11. Ce programme génère deux nouveaux produits :

- SR_MOD03 : ce produit contient l'ensemble des données de réflectance, d'épaisseur optique, ... dans les résolutions nominales des capteurs MODIS
- SR_CRS_MOD03 : ce produit contient les mêmes données que SR_MOD03, à la résolution de 10km⁶

Une fois ces produits générés, on projette les épaisseurs optiques dans les bandes 1 (620-670nm) et 3 (459-479nm) en utilisant MRTSwath ces données étant de type Swath et dans les résolutions natives des capteurs de MODIS(cf 4.3.3 et Figure 5.18).

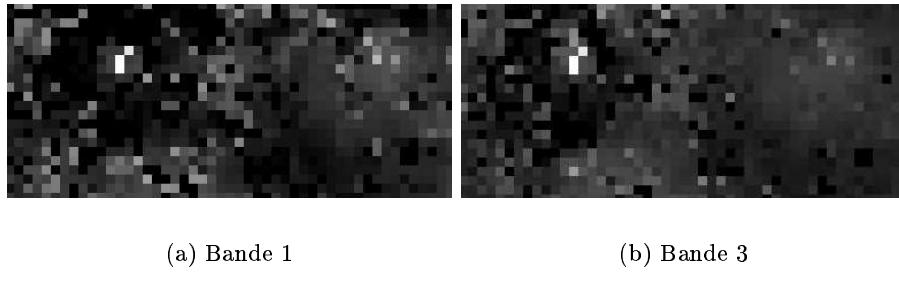


FIG. 5.18 – Epaisseurs optiques à 1km

Puis, on calcule l'épaisseur optique à 550nm par interpolation, à l'aide d'un modèle d'exponentielle issu de PGE11 :

$$\rho_{550nm} = \rho_{bande1} * e^{-0.160881n} \quad (5.7)$$

avec

$$n = 3.061719 \log \left(\frac{\rho_{bande1}}{\rho_{bande3}} \right) \quad (5.8)$$

Ainsi, on obtient les données à la résolution nominale d'1km (Figure 5.19).

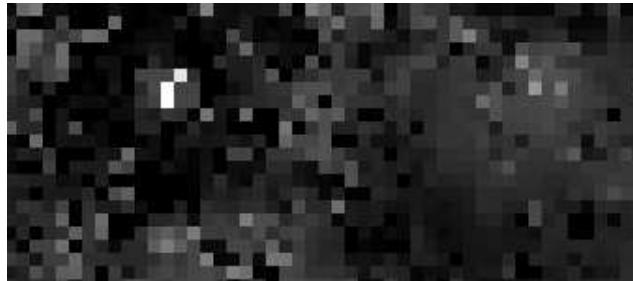


FIG. 5.19 – Epaisseur optique à 550nm, à la résolution nominale d'1km

⁶Les données contenues dans ces produits sont de type Swath

On observe que la qualité des données est améliorée (Figure 5.19), le fait que la résolution d'1km de l'épaisseur optique soit nominale permet de tenir compte des variations de celle-ci à petite échelle, notamment lors des changements de milieu (rural, urbain). Il suffit de comparer l'image de l'épaisseur optique à celle de l'orthophoto pour vérifier cela (5.20).

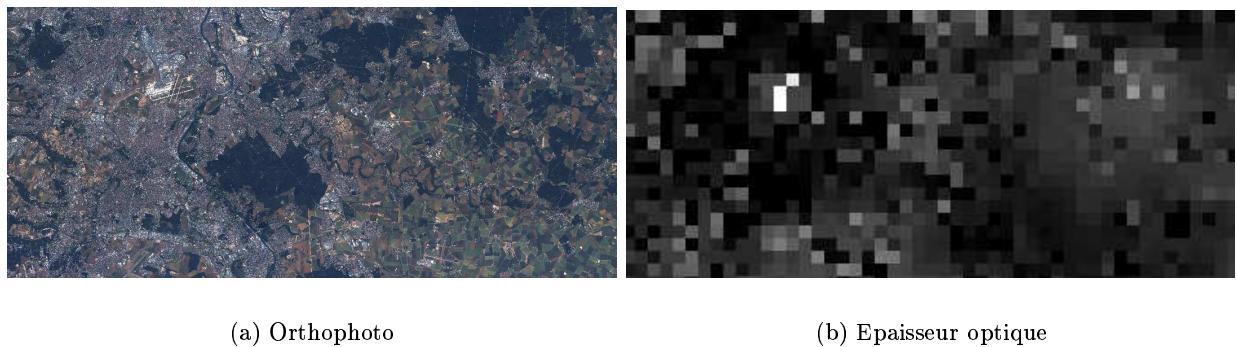


FIG. 5.20 – Comparaison épaisseur optique / milieu

Les coefficients de calibration obtenus à partir de cette épaisseur optique sont :

- 0.415781, pour le canal rouge
- 0.549161, pour le canal vert
- 0.403774, pour le canal bleu

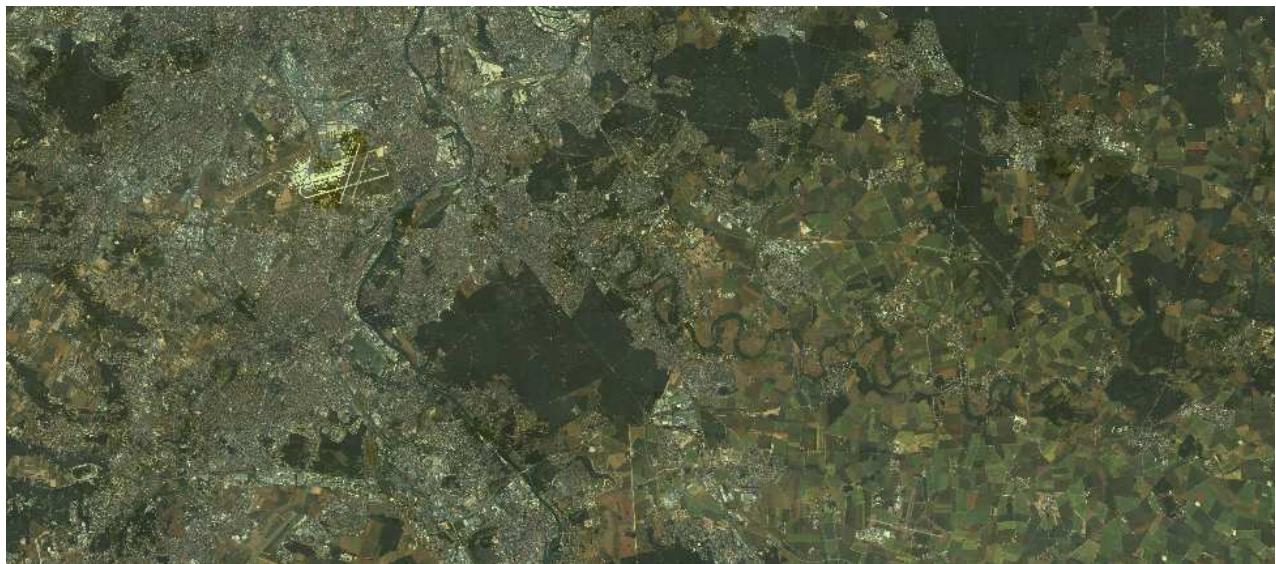


FIG. 5.21 – Ortho corrigée avec l'épaisseur optique issue de PGE11

On observe sur les images (Figures 5.21 et 5.22) que la calibration effectuée avec l'épaisseur optique de PGE11 améliore les résultats, les zones de saturations sont nettement atténuées (Tableau 5.23(a)) et les réflectances se rapprochent de celles de MODIS (Tableau 5.23(b)).



FIG. 5.22 – Saturation de l'ortho corrigée avec l'épaisseur optique issue de PGE11

	% de saturation
Canal rouge	0.0728
Canal vert	0.0017
Canal bleu	2.3083

(a) Pourcentage de saturation

	MODIS	Orthophoto	Erreur relative (%)
Canal rouge	0.0607097	0.057920	4.590
Canal vert	0.0680824	0.065753	3.421
Canal bleu	0.0332292	0.032418	2.441

(b) Moyennes des réflectances

FIG. 5.23 – Résultats issus de l'image 5.21, avec l'épaisseur optique généré par PGE11

L'histogramme est légèrement amélioré (Figure 5.24), l'offset est de : -0.008 pour le rouge, -0.004 pour le vert, et -0.025 pour le bleu. De plus, la forme des canaux est adoucie.

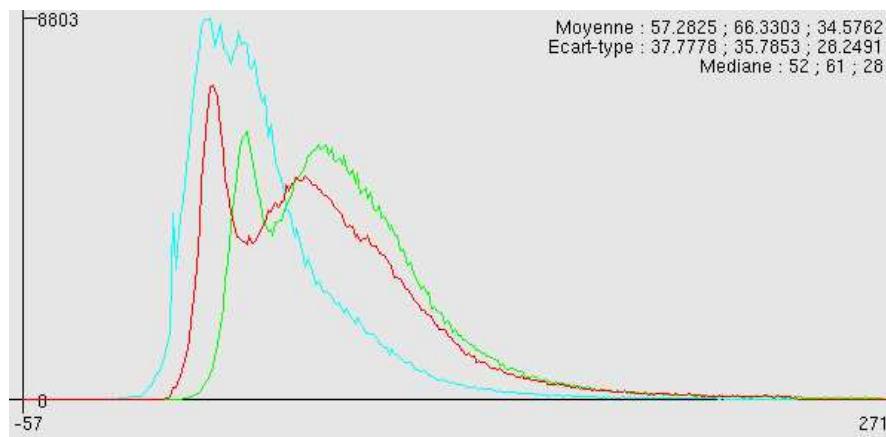


FIG. 5.24 – Histogramme de l'orthophoto corrigée avec l'épaisseur optique de PGE11

5.5 Comparaison avec une mission expérimentale

5.5.1 Présentation de la mission

Lors de travaux radiométriques au service de la recherche de l'IGN, une campagne expérimentale a été réalisée sur la ville de Toulouse, le 26 avril 2004, en collaboration avec l'ONERA. Lors de cette campagne de prises de vues, des filtres fins ont été placés devant les caméras du système PÉLICAN. Ainsi, on a obtenu des réponses spectrales très fines et il s'avère que celles-ci sont proches de celles des capteurs de MODIS. De plus, le système aéroporté a ensuite été calibré en laboratoire à l'aide d'une sphère intégrante. Ainsi, on peut comparer les coefficients de calibration obtenus en laboratoire à ceux obtenus par le processus précédemment détaillé afin de vérifier l'efficacité de celui-ci.

Les filtres utilisés ont pour caractéristiques⁷ :

	coupure basse	coupure haute	fréquence centrale	largeur de la bande
Canal rouge	655	685	670	30
Canal vert	535	565	550	30
Canal bleu	470	500	485	30

FIG. 5.25 – Caractéristiques des filtres

Ainsi, les réponses spectrales des canaux sont beaucoup plus fines que les réponses initiales (Figures 5.26 et 5.3).

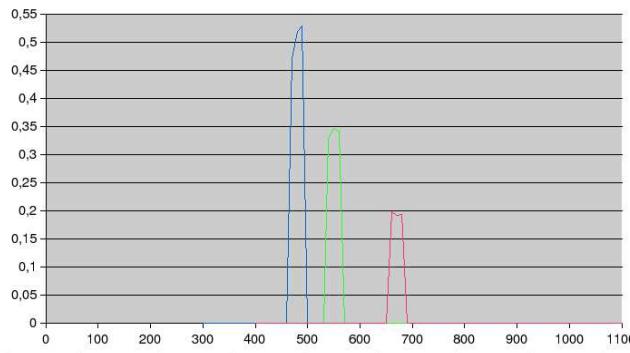


FIG. 5.26 – Réponses spectrales de la caméra combinée avec les filtres spéciaux

L'étalonnage radiométrique des caméras a été réalisé par l'ONERA devant une sphère intégrante à Astrium (Figure 5.27) [3]. Cet étalonnage a pour objectif de déterminer l'équation de passage des comptes numériques aux grandeurs physiques, ce qui correspond aux coefficients de calibration. Celui-ci se décompose en trois phases :

- homogénéiser les réponses de chacun des pixels de la matrice CCD. Cette étape comprend l'évaluation du courant d'obscurité et de la matrice d'égalisation
- évaluer la réponse spectrale de chacun des filtres associées aux canaux
- calculer le coefficient d'étalonnage absolu reliant un niveau de gris à une luminance dans chacun des filtres utilisés

⁷L'ensemble des valeurs est donnée en nanomètre



FIG. 5.27 – Étalonnage radiométrique du système PÉLICAN devant la sphère intégrante

La création de l'orthophoto de la mission à poser quelques problèmes, en effet la synchronisation des canaux n'a pas été faite durant les prises de vue, ainsi on observe un phénomène de flou sur l'ortho (Figure 5.28). Sachant la résolution des images des canaux (250 et 500m) générées à partir de cette orthophoto pour le calcul de la calibration, ce phénomène n'est pas gênant.



FIG. 5.28 – Orthophoto de la ville de Toulouse, à la résolution de 5m

Les données radiométriques et atmosphériques de MODIS du 26 avril 2004, sur la zone étudiée sont données ci-après (Figures 5.29 et 5.30).

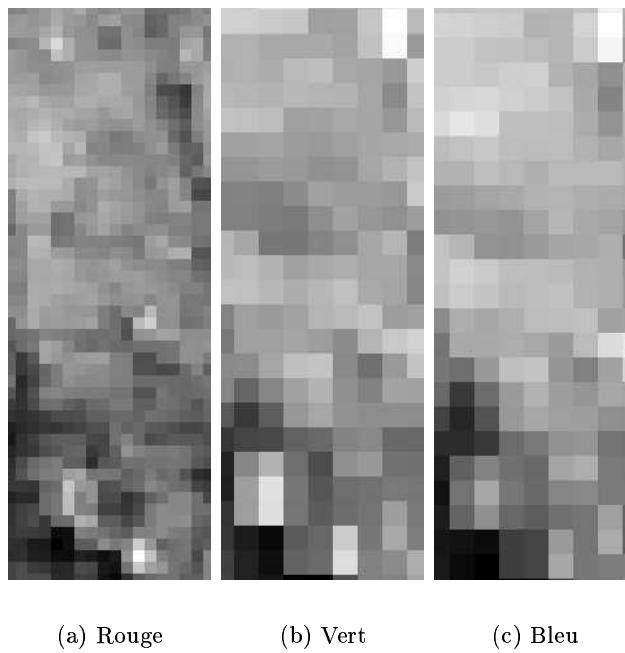


FIG. 5.29 – Images des réflectances MODIS reprojetées en Lambert NTF, sur la ville de Toulouse

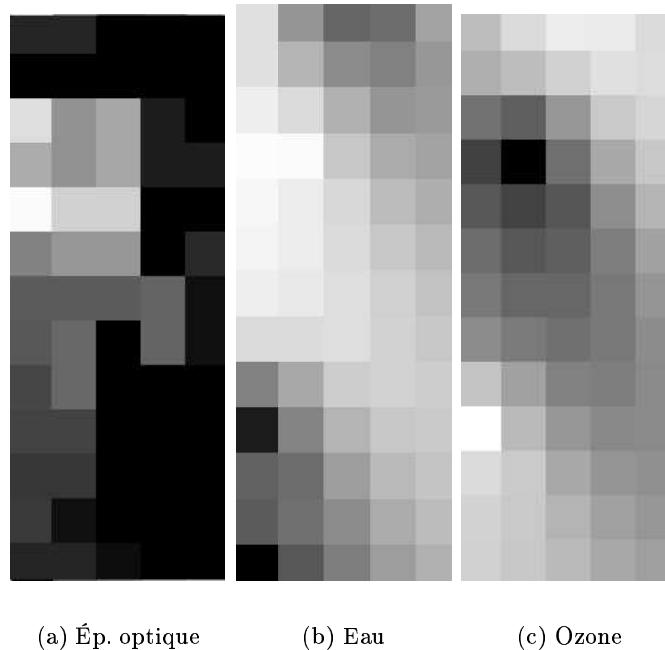


FIG. 5.30 – Images des données atmosphériques reprojetées en Lambert NTF, sur la ville de Toulouse

5.5.2 Les résultats de la calibration et comparaison

La région (Figure 5.28) a été corrigée à l'aide de la technique précédemment détaillée (Figure 5.31).



FIG. 5.31 – Orthophoto 5.28 corrigée radiométriquement

Les coefficients de calibration obtenus sont égaux à :

- 0.0515482, pour le canal rouge
- 0.0435302, pour le canal vert
- 0.0406202, pour le canal bleu

À noter que la calibration a été particulièrement efficace, ont a quasiment aucune saturation dans les canaux et l'histogramme (Figure 5.32) est corrigé des perturbations dues au voile atmosphérique.

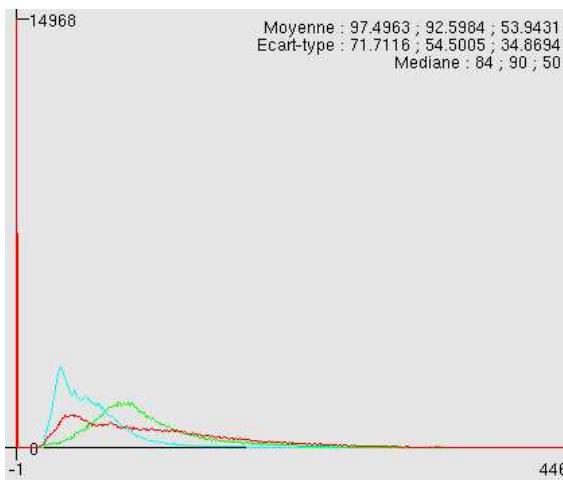


FIG. 5.32 – Histogramme de l'orthophoto 5.31

À présent, on va comparer les résultats à ceux du laboratoire (Figure 5.33).

	Laboratoire	6S	erreur relative (%)	rapport
Canal rouge	0.054580	0.0515482	5.551	0.9444
Canal vert	0.051850	0.0435302	16.04	0.8395
Canal bleu	0.047386	0.0406202	14.27	0.8572

FIG. 5.33 – Comparaison avec la calibration en laboratoire

On observe que les résultats issus de la technique de calibration mise en place à l'aide de 6S sont proches de ceux obtenus en laboratoire, avec un rapport quasi constant. Néanmoins, l'erreur relative varie de 5 à 16%, ce qui n'est pas négligeable. Mais de nombreuses remarques peuvent expliquer cette différence. Tout d'abord, la technique que j'ai mis en place n'a pas encore fait l'objet d'un bilan d'erreur, afin de mesurer la précision des calculs. Sachant les incertitudes sur les données MODIS et celles issues de 6S ainsi que du calcul de régression, il est possible d'obtenir une erreur de l'ordre de 10 à 20% sur les résultats. De plus, la calibration effectuée en laboratoire a connu quelques problèmes, lors du calcul des coefficients à l'aide de la sphère intégrante les résultats ont donné des valeurs biaisées d'un facteur 2 environ. Des tests sur le terrain, à l'aide d'un réflectomètre, ont permis d'obtenir les facteurs de corrections des coefficients de calibration. Ce biais sur le coefficient peut venir de diverses sources, notamment les effets de réflectance parasite de la sphère.

Malgré toutes les incertitudes sur le calcul de la calibration, les résultats obtenus sont corrects et proches de ceux obtenus en laboratoire. De plus, cette technique permet de s'affranchir des problèmes liés à la calibration absolue des images, comme pour le laboratoire, et ainsi réalise une calibration de manière absolue et approchée des images aériennes.

5.6 Implémentation de la calibration

L'ensemble du processus de calibration précédemment détaillé a été implémenté en C++ (Figure 5.34).

Pour réaliser cette implémentation quatres classes ont été créées :

ConstructionChantier : cette classe permet de gérer les images aériennes d'un chantier, notamment en géoréférençant les images initiales et en générant les images de chaque canal en incluant la FTM de MODIS

ProjectionModis : cette classe est dédiée à la reprojection des données MODIS, dans le système français (Lambert, NTF), elle gère également l'interpolation de l'épaisseur optique à 550nm à partir du SR_MOD03

Calibration : cette classe gère l'ensemble du processus de calibration, en faisant appel aux deux classes précédentes et à 6S ; elle initialise le modèle atmosphérique, calcul les coefficients de calibration, et corrige les images aériennes. Une gestion des sauvegardes des différentes données (données atmosphériques, ortho, carte des orientations) est également disponible

MultiCalibration : cette classe permet de réaliser une calibration sur un département, c'est à dire sur plusieurs chantiers et à des dates différentes, avec le calcul de coefficients de calibration locaux (par chantier) et globaux (sur l'ensemble des chantiers), et une gestion des sauvegardes de l'ensemble des données par chantier

Deux types de calibration sont à la disposition des utilisateurs :

- la calibration précise, prenant en compte les variations des données atmosphériques sur l'ensemble du chantier étudié
- la calibration rapide, effectuant la calibration des images en moyennant les données atmosphériques sur la zone du chantier, avec un temps d'exécution divisé par 3 environ

Un exécutable, nommé atmcor, est généré à l'aide de la classe englobante MultiCalibration. Ce programme permet d'effectuer une calibration à partir d'options entrées en ligne de commande (Figure 5.35).

L'exécutable fait environ 920Ko, le temps d'exécution est estimé à environ $18s/km^2$ pour la calibration avec 6S et celui de la génération des orientations et des orthophotos varie en fonction de la résolution.

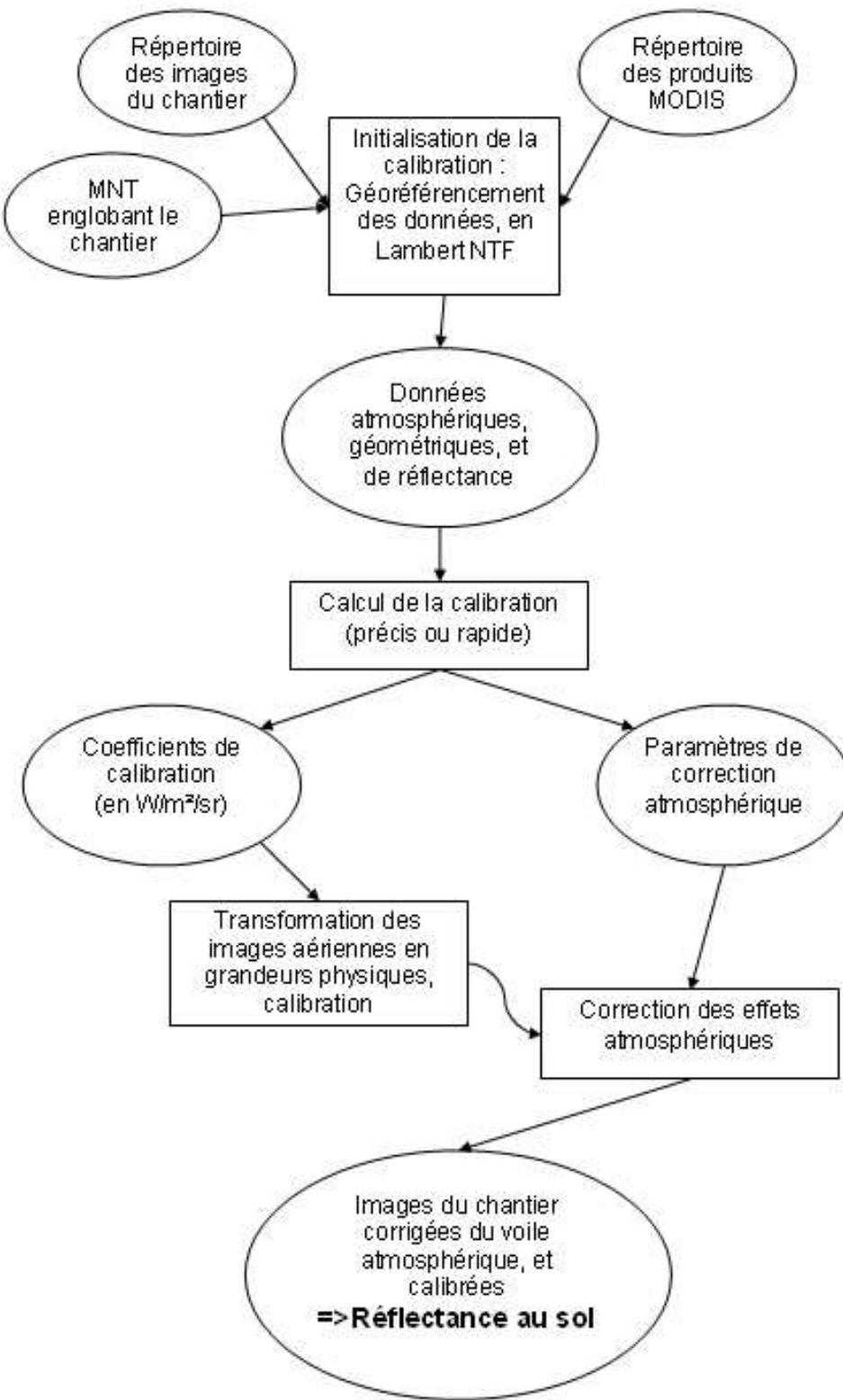
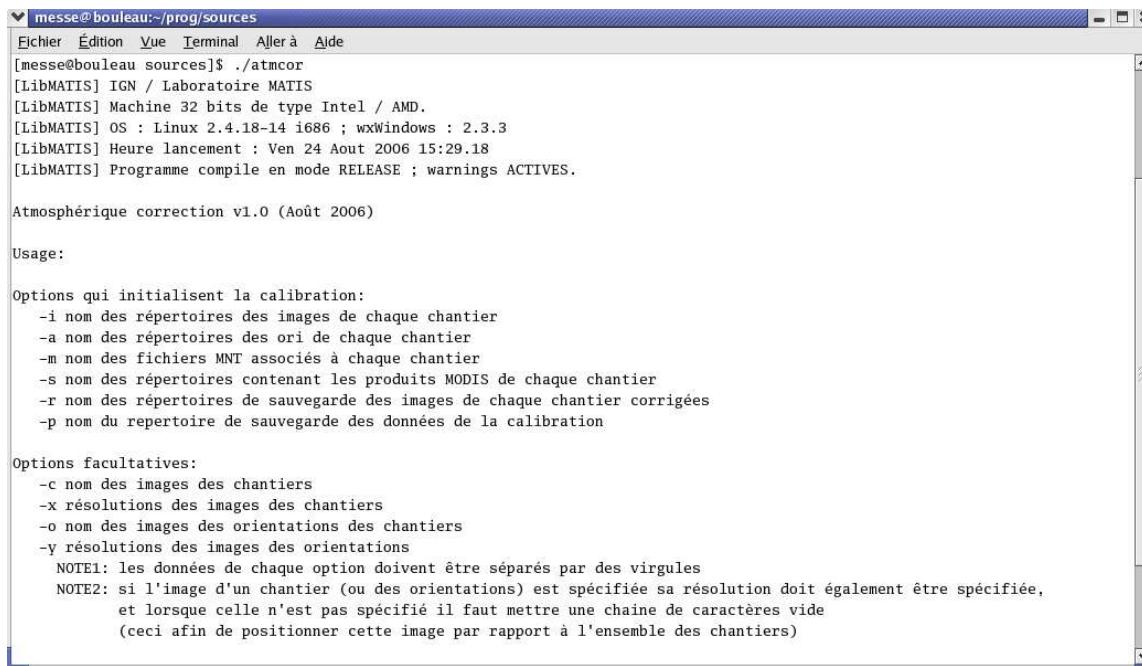


FIG. 5.34 – Schéma de l'implémentation logicielle, pour un chantier



The screenshot shows a terminal window titled "messe@bouleau:~/prog/sources". The window contains the following text:

```
Echier Édition Vue Terminal Aller à Aide
[messe@bouleau sources]$ ./atmcor
[LibMATIS] IGN / Laboratoire MATIS
[LibMATIS] Machine 32 bits de type Intel / AMD.
[LibMATIS] OS : Linux 2.4.18-14 i686 ; wxWindows : 2.3.3
[LibMATIS] Heure lancement : Ven 24 Aout 2006 15:29.18
[LibMATIS] Programme compile en mode RELEASE ; warnings ACTIVES.

Atmosphérique correction v1.0 (Août 2006)

Usage:

Options qui initialisent la calibration:
-i nom des répertoires des images de chaque chantier
-a nom des répertoires des ori de chaque chantier
-m nom des fichiers MNT associés à chaque chantier
-s nom des répertoires contenant les produits MODIS de chaque chantier
-r nom des répertoires de sauvegarde des images de chaque chantier corrigées
-p nom du repertoire de sauvegarde des données de la calibration

Options facultatives:
-c nom des images des chantiers
-x résolutions des images des chantiers
-o nom des images des orientations des chantiers
-y résolutions des images des orientations

NOTE1: les données de chaque option doivent être séparés par des virgules
NOTE2: si l'image d'un chantier (ou des orientations) est spécifiée sa résolution doit également être spécifiée,
et lorsque celle n'est pas spécifié il faut mettre une chaîne de caractères vide
(ceci afin de positionner cette image par rapport à l'ensemble des chantiers)
```

FIG. 5.35 – Capture écran de l'utilisation de atmcor

Conclusion et perspectives

Actuellement, les images fournies par l'IGN sont imprécises et reviennent très chers. Or, à l'ère de la navigation virtuelle sur les portails internet tels que Google-Earth (Google) ou le GéoPortail (IGN), la possibilité de mettre à la disposition des usagers des données de qualité supérieure permet de faire face à la concurrence, et ainsi de se positionner au premier rang dans la diffusion de données géographiques.

La calibration des images peut se faire soit en laboratoire avec une sphère intégrante, soit à partir d'un logiciel de transfert radiatif. Cependant, le coût d'une sphère intégrante est très élevé, ainsi l'utilisation d'un logiciel permet de réaliser un étalonnage radiométrique approché à moindre coût. La technique de calibration mise en place à l'aide du logiciel de transfert radiatif 6S et des données atmosphériques de MODIS, permet d'obtenir des images aériennes d'une qualité remarquable. Nous avons directement accès aux propriétés physiques de la surface observée, permettant de réaliser des travaux de télédétection de précision, en particulier lors de comparaisons multidiates. Par ailleur, la balance des blancs des images aériennes sera facilitée, car les images issues de la calibration ont une balance des blancs basée sur celle des images de MODIS. Malgré les résultats très satisfaisants de cette intercalibration, des améliorations peuvent être apportées : les données MODIS étant dans des résolutions de l'ordre de quelques centaines de mètres, il serait intéressant de rechercher s'il n'existe pas d'instruments fournissant les mêmes types de données gratuitement et de qualité supérieure.

Le processus de calibration est opérationnel, ainsi celui-ci va faciliter le travail des opérateurs chargés de la calibration, en effectuant celle-ci de manière automatique et approchée. Le coût horaire sera ainsi diminué, de même que le coût de production. Néanmoins, une petite formation est indispensable pour l'utilisation du logiciel, notamment sur les données MODIS et les démarches pour commander et récupérer celles-ci via des serveurs internet.

Ce stage de fin d'étude fut très enrichissant tant sur le plan technique et scientifique que sur le plan personnel. J'ai eu l'occasion de découvrir le domaine des sciences géographiques qui m'était totalement inconnu auparavant. J'ai également approfondi mes connaissances au niveau informatique ayant rencontré de nombreux langages (C, C++, Fortran, Java ... et également le L^AT_EX pour la rédaction de ce rapport), et en travaillant sous Linux. Ce stage de recherche sur un projet novateur fut plaisant et stimulant et m'a permis d'étudier la calibration des images qui est un domaine fondamental à la base du pré-traitement d'images. Cette expérience fut riche et porteuse, celle-ci s'inscrivant dans mes souhaits de formation, et orientant mon choix professionnel vers le traitement d'images.

Remerciements

Il m'est difficile, vu le nombre de personnes rencontrées lors de ce stage, de citer toutes celles que je désire remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon maître de stage, Monsieur Gilles Martinoty, pour avoir suivi et orienté mes travaux tout le long de ma formation, pour ses remarques judicieuses qui m'ont guidé dans mon étude et mes choix, et pour son initiation à la recherche.

Je tiens aussi à remercier le personnel qui m'a accueilli au MATIS, et tout particulièrement Corina Iovan, ma collègue de bureau, pour sa gentillesse et son soutien, et François Boyero, le technicien informatique, pour sa bonne humeur infatigable.

Je remercie aussi toutes les personnes que j'ai cotoyées lors de ce stage pour m'avoir accueilli chaleureusement et m'avoir fait partager leur savoir-faire.

J'exprime de plus mes remerciements à Madame Sylvie Treuillet, enseignante à Polytech'Orléans, pour l'intérêt qu'elle a porté à mon projet, et son encadrement assidu.

Bibliographie

- [1] S. Chandrasekhar. *Radiative transfer*. Dover Publication, 1960.
- [2] A.R. Curtis. The computation of radiative heating rates in the atmosphere. *Proc. Roy. Soc. London*, A236 :156–159, 1956.
- [3] J. Duffaut P. Déliot. *Characterization and calibration of a high-resolution multi-spectral airborne digital camera*, volume 35. 2005.
- [4] Kneizys E.P. Shettle W.O. Gallery J.H. Chetwynd L.W. Abreu J.E. Selby R.W. Fenn. *Atmospheric transmittance/radiance, Computer Code LOWTRAN 5*. Number 687 in AFGL-TR 80-006. Hanscom AFB, 1980.
- [5] R.M. Goody. Atmospheric radiation 1, theoretical basis. *Oxford University Press*, 436 pp, 1964.
- [6] Hierarchical data format (hdf). <http://hdf.ncsa.uiuc.edu/>.
- [7] Hdf-eos to geotiff converter. <http://www.hdfEOS.org/software/HEG/>.
- [8] High-resolution transmission molecular absorption database, 2001. <http://efabwww.harvard.edu/HITRAN/>.
- [9] W. Malkmus. Random lorentz band model with exponential- tailed s^{-1} line-intensity distribution function. *J. Opt. Soc. Am.* 57, 3 :323–329, 1967.
- [10] The modis website. <http://modis.gsfc.nasa.gov>.
- [11] Modis atmosphere. <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>.
- [12] Modis land. <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/surfrad.htm>.
- [13] Modis reprojection tool distribution page. <http://edcdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/>.
- [14] Modis swath reprojection tool distribution page. <http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/mrtswath/>.
- [15] V.V. Sobolev. *Light scattering in planetary atmospheres*. Pergamon Press, 1975.
- [16] D. Tanré E. Vermote. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum. *IEEE Transactions on Geoscience end remote Sensing*, 35 :675–686, 1997.
- [17] W.E. Meador W.R. Weaver. Two-stream approximation to radiative tranfer in planetary atmospheres : a unified description of existing methods and a new improvement. *J. Atmos. Sci.*, 37 :630–643, 1980.
- [18] J.H. Joseph W.J. Wiscombe J.A. Weinman. The delta-eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.*, 33 :2242–2459, 1976.
- [19] W.G. Zdunkowski R.H. Welch. Back scattering approximations and thier influence on eddington-type solar flux calculation. *Beitr. Phys. Atmosph.*, 55(1) :28–42, 1982.

Annexe A

Transmittance des gaz atmosphériques

A.1 La transmittance gazeuse

Pour calculer la transmittance gazeuse entre 0.25 et $4\mu\text{m}$ avec les différents chemins, on considère les six gaz séparément (O_2 , CO_2 , H_2O , O_3 , CH_4 , et N_2O). La transmittance totale est égale au produit des transmittances de chaque gaz. La résolution spectrale est égale à 10cm^{-1} .

On utilise deux modèles de bandes d'exponentielles aléatoires (Goody [5] pour l' H_2O et Malkmus [9] pour les autres gaz). Si nous considérons un chemin homogène, la fonction de transmittance est donnée par :

– pour H_2O

$$t_{\Delta\nu}^G = \exp\left[-\frac{N_0 km}{\Delta\nu}(1 + \frac{km}{\pi\alpha_0})^{-1/2}\right] \quad (\text{A.1})$$

– pour les autres gaz

$$t_{\Delta\nu}^M = \exp\left[-\frac{2\pi\alpha_0 N_0}{\Delta\nu}((1 + \frac{km}{\pi\alpha_0})^{-1/2} - 1)\right] \quad (\text{A.2})$$

où m la concentration d'absorption, N_0 le nombre total de ligne dans l'intervalle de fréquence $\Delta\nu$, k l'intensité moyenne et α_0 la moyenne des demiées largeur du profil de Lorentz obtenue à partir des intensités S_j et des demiées largeur α_j de la j^{ime} ligne spectrale :

$$k = \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{N_0} S_j \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{k}{\pi\alpha} = \frac{1}{4} \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_0} S_j}{\sum_{j=1}^{N_0} (S_j \alpha_j)^{1/2}} \right]^2 \quad (\text{A.4})$$

La résolution spectrale de 10cm^{-1} est suffisante et contient suffisamment de lignes spectrales pour utiliser un modèle de bande aléatoire.

Généralement, la largeur d'une ligne spectrale correspond au produit de convolution de deux gabarits (Lorentz et Doppler) et est appelé une ligne de Voigt. Pour un gaz atmosphérique, l'altitude est d'environ 30km lorsque les largeurs de Lorentz et de Doppler sont équivalentes. Ainsi, suivant la distribution verticale, seul l' O_3 nécessite un traitement plus complexe pour prendre en compte un profil de Voigt.

Les équations A.1 et A.2 sont valides pour un chemin homogène où la pression et la température sont constantes. Pour prendre en compte les variations de la température et de la pression, on utilise l'approximation de Curtis-Godson [2] qui associe une quantité \bar{m} pondérée par la température, et $m\phi$ pondérée par la pression.

$$\bar{m}(z, z') = \int_z^{z'} \Phi(T) du \quad (\text{A.5})$$

$$\bar{m}\phi(z, z') = \int_z^{z'} \Psi(T)\phi du \quad (\text{A.6})$$

avec, $\phi = p/p_0$ (p_0 est la pression standard donnée par les mesures des paramètres spectroscopiques), $du = \rho_g(dz/\mu)$ (g est la densité gazeuse et μ le cosinus de l'angle de visée).

Les fonctions $\Phi(T)$ et $\Psi(T)$ sont données par :

$$\Phi(T) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} S_j(T)}{\sum_{j=1}^{N_0} S_j(T_r)} \quad (\text{A.7})$$

$$\Psi(T) = \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_0} [S_j(T)\alpha_{j0}(T)]^{1/2}}{\sum_{j=1}^{N_0} [S_j(T_r)\alpha_{j0}(T_r)]^{1/2}} \right]^2 \quad (\text{A.8})$$

avec T_r la température de référence et α_{j0} la demie largeur à la température T_r et pression p_0 .

Pour simplifier, on remplace ces fonctions par :

$$\Phi(T) = \exp[a(T - T_r) + b(T - T_r)^2] \quad (\text{A.9})$$

$$\Psi(T) = \exp[a'(T - T_r) + b'(T - T_r)^2] \quad (\text{A.10})$$

Les données spectroscopiques sont données à partir de la compilation des paramètres atmospHERIQUES des lignes d'absorption (édition 1991) AFGL (Air Force GeoPhysics Lab.). On choisit les paramètres suivants :

- la position en cm^{-1}
- la ligne intégrée $S_j(T_r)$ à 296K en $cm^{-1}/molecules - cm^2$
- la demie largeur α_{j0} à 1013 mb en cm^{-1}
- l'énergie de la plus petite transition d'état.

La demi-largeur est obtenue par :

$$\alpha_j(p, T) = \alpha_{j0} \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_r}{T} \right)^{1/2} \quad (\text{A.11})$$

et l'intensité est calculée à partir de la partition vibrationnelle et rotationnelle et de l'énergie de la plus basse transition d'état.

Les fonctions de transmittance s'écrivent :

$$t_{\Delta\nu}^G = \exp \left[-\frac{k\bar{m}}{\delta} \left(1 + \frac{k}{\pi\alpha_0} \frac{\bar{m}^2}{m\phi} \right)^{-1/2} \right] \quad (\text{A.12})$$

$$t_{\Delta\nu}^M = \exp \left[-\frac{\pi\alpha_0}{\delta} \frac{\bar{m}\phi}{2\bar{m}} \left(\left(1 + \frac{4m}{\pi\alpha_0} \frac{\bar{m}^2}{m\phi} \right)^{-1/2} - 1 \right) \right] \quad (\text{A.13})$$

Étant donnée la précision des données spectroscopiques, la fonction de transmittance de l'ozone est donnée par :

$$t_{O_3}(\Delta v) = \exp(-A_{O_3}(\Delta v)u_{O_3}) \quad (\text{A.14})$$

où u_{O_3} est la quantité d'absorption, A_{O_3} le coefficient d'absorption donné par Kneizys and al. [4].

Pour prendre en compte le continuum des vapeurs d'eau, on utilise la même expression avec le coefficient A_{H_2O} .

A.2 Les fenêtres atmosphériques

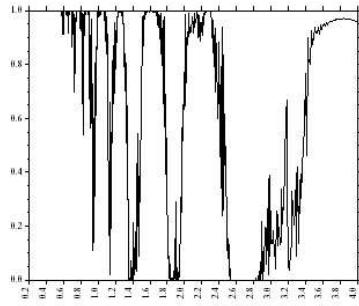


FIG. A.1 – Transmittance spectrale d' H_2O

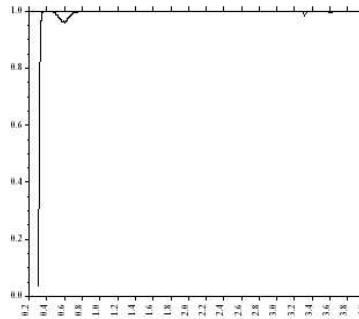


FIG. A.2 – Transmittance spectrale d' O_3

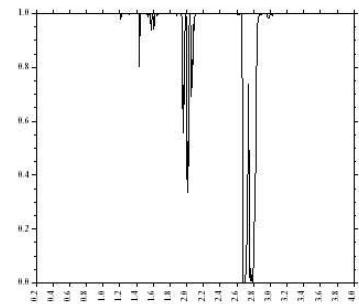
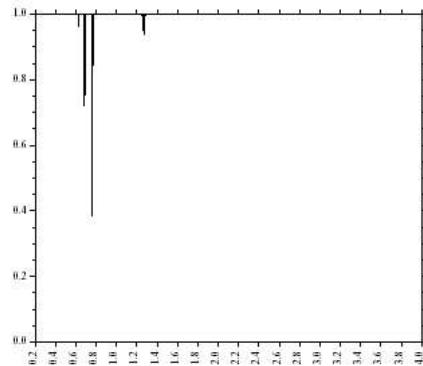
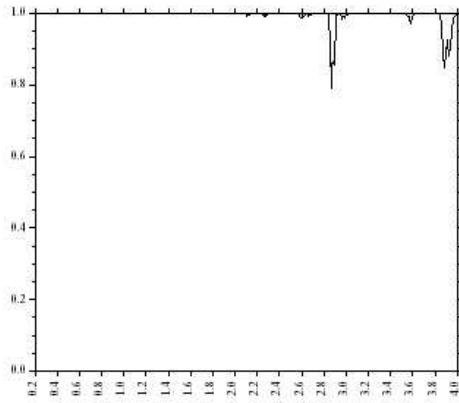
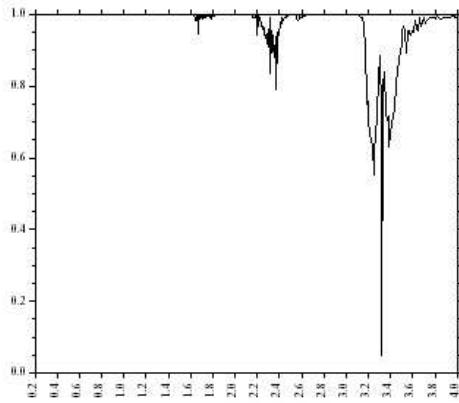


FIG. A.3 – Transmittance spectrale de CO_2

FIG. A.4 – Transmittance spectrale de O_2 FIG. A.5 – Transmittance spectrale de N_2O FIG. A.6 – Transmittance spectrale de CH_4

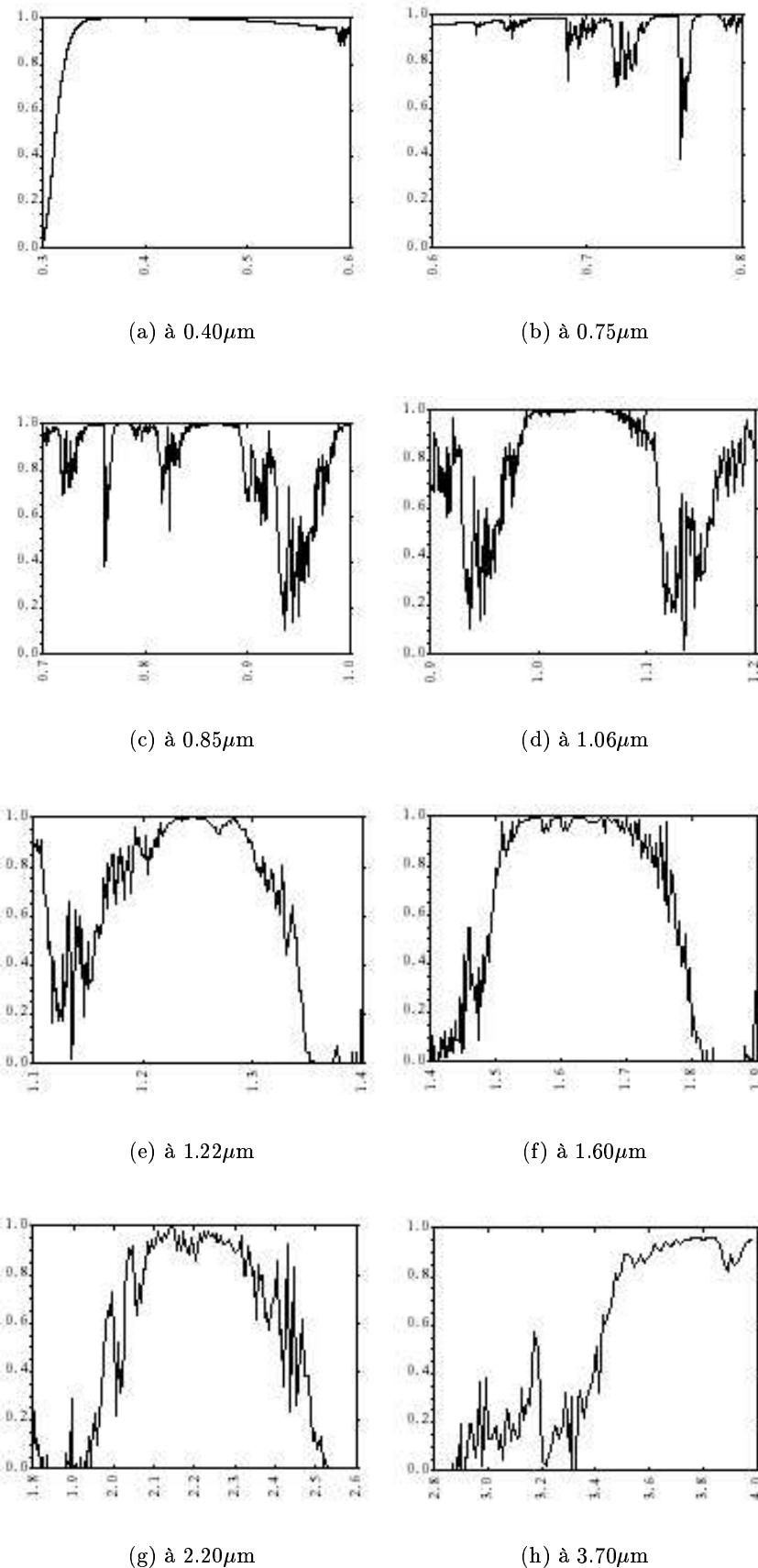


FIG. A.7 – Fenêtre atmosphérique

Annexe B

Les données 6S

B.1 Les données d'initialisation

0	(USER'S CONDITIONS)
40.0 100.0 45.0 50.0 7 23	
8	(USER'S MODEL)
3.0 0.35	(UH2O(G/CM2) , UO3(CM-ATM))
4	(AEROSOLS MODEL)
0.25 0.25 0.25 0.25	(% OF:DUST-LIKE,WATER-SOL,OCEANIC,SOOT)
0	(NEXT VALUE IS THE AER. OPT. THICK. @550)
0.50	(AERO. OPT. THICK. @550)
-0.2	(TARGET AT 0.2 km)
-3.3	(AIRCRAFT AT 3.3 KM ABOVE GROUND LEVEL)
-1.5 -0.35	(UH2O and UO3 under the plane not avail.)
0.25	(AERO. OPT. THICK. under the plane @550)
11	(AVHRR 1 (NOAA 9) BAND)
1	(GROUND TYPE, I.E. NON UNIFORME SURFACE)
2 1 0.50	(TARGET, ENV., RADIUS(KM))
-0.10	(ATMOSPHERIC CORRECTION OF RAPP=0.10)

FIG. B.1 – Exemple de données en entrée de 6S

B.2 Les données en sortie

```
*****
*                                6s version 4.1 ****
*                                geometrical conditions identity
*                                -----
*                                user defined conditions
*                                -----
* month: 7 day : 23
* solar zenith angle: 40.00 deg solar azimuthal angle: 100.00 deg
* view zenith angle: 45.00 deg view azimuthal angle: 50.00 deg
* scattering angle: 146.49 deg azimuthal angle difference: 50.00 deg
*                                -----
*                                atmospheric model description
*                                -----
* atmospheric model identity :
*      user defined water content : uh2o= 3.000 g/cm2
*      user defined ozone content : uo3 = .350 cm-atm
*      aerosols type identity : user defined aerosols model
*          .250 % of dust-like
*          .250 % of water-soluble
*          .250 % of oceanic
*          .250 % of soot
* optical condition identity :
*      visibility : 8.49 km opt. thick. 550nm : .5000
*                                -----
*                                spectral condition
*                                -----
*      avhrr 1 (noaa9) value of filter function
*      wl inf= .530 mic wl sup= .810 mic
*                                -----
* target type
*      inhomogeneous ground , radius of target .500 km
*      target reflectance :
*      spectral clear water reflectance      .045
*      environmental reflectance :
*      spectral vegetation ground reflectance .129
*                                -----
* target elevation description
*                                -----
*      ground pressure [mb] 989.01
*      ground altitude [km] .200
*      gaseous content at target level:
*      uh2o= 3.000 g/cm2           uo3= .350 cm-atm
*                                -----
* plane simulation description
*                                -----
*      plane pressure [mb] 657.54
*      plane altitude [km] 3.500
* atmosphere under plane description:
*      ozone content      .008
*      h2o content       2.389
*      aerosol opt. thick. 550nm   .281
*                                -----
*      atmospheric correction activated
*                                -----
*      input apparent reflectance : .100
*****
```

FIG. B.2 – Exemple de données en sortie de 6S (1/3)

```
*****
*          integrated values of :
*          -----
*          apparent reflectance .0442    appar. rad.(w/m2/sr/mic) 17.028
*          total gaseous transmittance .932
*****
*
*          coupling aerosol -wv :
*          -----
*          wv above aerosol : .044    wv mixed with aerosol : .044
*          wv under aerosol : .044
*
*          int. normalized values of :
*          -----
*          % of irradiance at ground level
*          % of direct irr.   % of diffuse irr.   % of enviro. irr
*          .792           .203           .005
*          reflectance at satellite level
*          atm. intrin. ref.   environment ref.   target reflectance
*          .020           .014           .014
*
*          int. absolute values of
*          -----
*          irr. at ground level (w/m2/mic)
*          direct solar irr.   atm. diffuse irr.   environment irr
*          617.585           157.626           3.673
*          rad at satel. level (w/m2/sr/mic)
*          atm. intrin. rad.   environment rad.   target radiance
*          7.605             5.246             5.525
*
*          int. funct filter (in mic)           int. sol. spect (in w/m2)
*          .1174545                  185.589
*****
*****
```

FIG. B.3 – Exemple de données en sortie de 6S (2/3)

```
*****
*                                integrated values of   :
* -----
*
*          downward      upward      total
* global gas. trans. : .94431     .98066     .93234
* water   "   "   : .98573     .98623     .97592
* ozone   "   "   : .96462     .99907     .96373
* co2     "   "   : 1.00000    1.00000    1.00000
* oxyg   "   "   : .99344     .99533     .99179
* no2     "   "   : 1.00000    1.00000    1.00000
* ch4     "   "   : 1.00000    1.00000    1.00000
* co      "   "   : 1.00000    1.00000    1.00000
*
* rayl. sca. trans. : .96436     .93710     .90371
* aeros. sca.   "   : .70714     .81147     .57382
* total   sca.   "   : .67814     .80093     .54315
*
*
*          rayleigh      aerosols      total
* spherical albedo   : .04934     .04532     .06365
* optical depth total: .05550     .41782     .47332
* optical depth plane: .01848     .23471     .25320
* reflectance        : .01081     .01274     .02081
* phase function     : 1.26026    .30427     .41637
* sing. scat. albedo : 1.00000    .48167     .54245
*
*****
*                                atmospheric correction result
* -----
*
* input apparent reflectance   : .100
* measured radiance [w/m2/sr/mic] : 38.529
* atmospherically corrected reflectance : .156
* coefficients xa xb xc           : .00513 .04109 .06365
* y=xa*(measured radiance)-xb ; acr=y/(1.+xc*y)
*****
```

FIG. B.4 – Exemple de données en sortie de 6S (3/3)

Annexe C

La géodésie

C.1 Introduction

La géodésie est la science de la forme, des dimensions de la Terre et de son champ de pesanteur. Elle intervient en amont de toute cartographie ou navigation.

Un objectif important de la cartographie est de représenter des éléments de la réalité avec le plus d'exactitude possible dans le positionnement absolu ou relatif. Pour cela, la localisation des éléments dans l'espace (2D ou 3D) doit se faire en s'appuyant sur un référentiel que l'on appelle le système de coordonnées. Par nature, la surface terrestre (géoïde) n'est pas une forme géométriquement parfaite, une approximation mathématique (ellipsoïde) est donc nécessaire pour pouvoir en faire un référentiel (sphérique ou ellipsoïdal) à partir duquel sera construit le système de coordonnées. On notera que cette forme mathématique théorique peut varier selon la zone géographique que l'on traite et la précision que l'on recherche. Elle détermine les coordonnées de points de repère dans des systèmes de référence géodésique. L'ensemble des points matérialisés sur le terrain (bornes géodésiques, châteaux d'eau, etc...) forme un canevas couvrant toute la France, canevas auquel les levés topographiques se rattachent de façon homogène.

C.2 Mise en oeuvre de la géodésie

Représentation de la surface terrestre

La forme de l'enveloppe terrestre est une surface géométriquement imparfaite. Globalement sphérique, la Terre est légèrement aplatie aux pôles du fait de sa rotation. On quantifie donc la surface terrestre de Géoïde. Pour une cartographie à très petite échelle (par exemple 1 :10 000 000), on peut assimiler la surface terrestre à une sphère. Cependant, pour une cartographie à plus grande échelle (par exemple 1 :10 000), la sphère n'est pas une très bonne approximation. Ainsi, pour une cartographie à plus grande échelle, on assimile le géoïde à un ellipsoïde (Figure C.1).



FIG. C.1 – Représentation de la surface terrestre

Les géoïdes sont des représentations gravitationnelles de la surface de la Terre. La géométrie est complexe et ne peut être formulée mathématiquement de façon simple. Ils ne peuvent donc pas être utilisés en cartographie.

L'ellipsoïde est une surface géométrique permettant de représenter assez fidèlement la forme du géoïde. Il s'obtient en faisant tourner une ellipse par rapport à un de ses deux axes. Les ellipsoïdes utilisés en géodésie ont un coefficient d'aplatissement très faible (environ 0.003). Pour cette raison on parlera souvent de sphéroïde. Un ellipsoïde se définit par la longueur de son demi grand axe (a) et la longueur de son demi petit axe (b). L'aplatissement d'un ellipsoïde est égale à $f = \frac{(a-b)}{a}$.

Les systèmes géodésiques

Le positionnement de points dans l'espace et le temps au voisinage de la Terre nécessite la définition d'un système géodésique de référence. C'est un repère affine (O, i, j, k) tel que (Figure C.2) :

- O est proche du centre des masses de la Terre (pour les systèmes terrestres à moins de 500m et pour les systèmes spatiaux à moins de 10m)
- OZ est proche de l'axe de rotation terrestre
- OXZ est proche du plan méridien origine

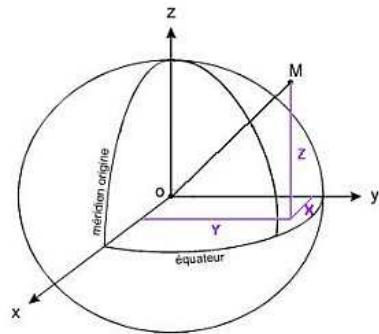


FIG. C.2 – Repère cartésien

Les coordonnées géodésiques d'un point ne sont pas des valeurs "objectives" liées au seul point d'observation M mais sont relatives à une construction théorique ou modèle au sens large. Par exemple, pour un ensemble de points réalisé par géodésie terrestre (triangulation), on fixe un ellipsoïde, un point fondamental arbitrairement choisi, et on réalise une campagne d'observations d'angles, de distances et d'azimuts¹; puis on met en oeuvre un processus de compensation. Si un quelconque de ces éléments est modifié, les coordonnées des points le sont également : on change de système.

Dans un système de référence géodésique, un point de la croûte terrestre est quasiment fixe bien qu'il soit soumis à de faibles mouvements dus aux marées terrestres d'amplitude <30cm, à la surcharge océanique et aux mouvements tectoniques globaux ou locaux, inférieur à 10cm/an.

Les paramètres de positionnement du système lui-même peuvent être calculés à partir d'un point fondamental ou à l'origine d'un repère géocentrique conventionnel. Un tel système de référence étant défini, chaque point est repéré, à un instant donné, par des coordonnées, cela implique la connaissance d'un ellipsoïde associé et sa position dans l'espace.

¹L'azimut est la position d'un objet par rapport à l'horizon indiqué par une boussole.

De nombreux systèmes coexistent, en raison de dispositions légales, réglementaires, ou historiques, de l'amélioration des techniques et des modèles, de l'élargissement de la zone d'application des techniques à la Terre entière.

Réseau géodésique

Un réseau est un ensemble de points physiquement liés à la croûte terrestre (bornes, piliers...) dont on décrit la position définie par des coordonnées estimées et leurs variations. On différencie certains types de réseaux, à savoir :

1. des réseaux ou réalisations planimétriques
2. des réseaux de nivellation
3. des réseaux tridimensionnels géocentriques

On distingue également les réseaux dits "cinématiques" fournissant la position et la vitesse des points matérialisés, des réseaux "dynamiques" qui couvrent les notions de trajectoire ou éphémérides² de satellites.

Avec un réseau, une réalisation géodésique nécessite donc la mise en oeuvre d'un système géodésique qui peut être résumé par l'ensemble des constantes et algorithmes qui doivent intervenir dans le processus d'estimation des coordonnées.

Datums, systèmes en usage en France

En géodésie, on distingue l'ellipsoïde global de l'ellipsoïde local.

Les ellipsoïdes globaux sont utilisés pour des cartographies couvrant l'ensemble (ou une grande partie) de la surface terrestre. Le système lié à ce type d'ellipsoïde est dit spatial.

Les ellipsoïdes locaux sont définis de manière à épouser au mieux la forme du géoïde sur une zone restreinte de la surface terrestre (région ou pays). Par exemple, pour la France on utilise depuis les années 70, l'ellipsoïde de Clarke 1880 pour le système géodésique NTF (Nouvelle Triangulation Française) servant aux systèmes de coordonnées Lambert (1,2,3 et 4). Le système lié à ce type d'ellipsoïde est dit local. Localement, afin de mieux suivre la forme du géoïde, la forme de l'ellipsoïde est modifiée et son centre est décalé par rapport au centre des ellipsoïdes globaux (Figure C.3).

Pour pouvoir définir un système de coordonnées, la seule spécification d'un ellipsoïde n'est pas suffisante. En effet, un système géodésique (en anglais datum) se définit par son ellipsoïde mais également par la position de cet ellipsoïde par rapport au centre de la Terre. Pour les calculs géodésiques, par convention, on utilise le centre du système géodésique WGS84 (World Geodetic System 1984) pour définir la position des autres systèmes.

Ainsi, pour définir un système, il est nécessaire de connaître la forme de l'ellipsoïde, et la matrice de transformation par rapport au système WGS84 (3 rotations, 3 translations et un facteur d'échelle).

²L'éphéméride d'un satellite désigne sa position.

Systèmes locaux	Systèmes spatiaux
principe : <ul style="list-style-type: none"> - ellipsoïde de référence - point fondamental - méridien origine - représentation plane associée précision du centre : quelques centaines de mètres.	principe : <ul style="list-style-type: none"> - constantes fondamentales - coordonnées tridimensionnelles (longitude, latitude, hauteur ellipsoïdale) précision du centre : quelques mètres.
Réalisations historiques France :	Systèmes mondiaux :
<ul style="list-style-type: none"> - triangulation de Cassini (1733-1770) - triangulation des Ingénieurs Géographes (1792-1884) 	<ul style="list-style-type: none"> - World Geodetic System 1984 (WGS84) - International Terrestrial Reference System (ITRS)
Système européen :	Système européen :
<ul style="list-style-type: none"> - European Datum 1950 (ED50) 	<ul style="list-style-type: none"> - European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)
Système actuel en France :	Système actuel en France :
<ul style="list-style-type: none"> - Nouvelle Triangulation de la France (NTF) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réseau Géodésique Français 1993 (RGF93)

FIG. C.3 – Différences entre les systèmes locaux et spatiaux

Systèmes locaux

Les systèmes d'usage en France sont le résultat de l'historique des réalisations passées :

- méridienne de Picard (1669-1671)
- méridienne de Cassini (1683-1718)
- triangulation de Cassini (1733-1770)
- méridienne de France (1739-1740)
- triangulation des Ingénieurs géographes (1792-1884) appuyée sur la méridienne de Delambre et Méchain
- nouvelle méridienne de France (1870-1896)

Nous allons nous intéresser par la suite uniquement au système en vigueur en France : La NTF. Cette triangulation similaire à celles effectuées par Cassini et les ingénieurs Géographes, poursuit l'objectif de la réalisation de la cartographie nationale à moyenne échelle. Ce système NTF est matérialisé sur le terrain par un réseau géodésique hiérarchisé :

1. réseau principal :
 - 800 points de premier ordre espacés de 30km environ
 - 5000 points de second ordre espacés de 10km
 - 60000 points de 3^{ime} et 4^{ime} ordre espacés de 3km
2. réseau complémentaire :
 - 20000 points de précisions diverses
3. caractéristiques du système :
 - point fondamental : croix du Panthéon
 - ellipsoïde associée : Clarke 1880 IGN
 - représentation plane associée : Lambert zone 1,2,3 et 4
 - méridien origine : Paris

Systèmes spatiaux

Nous allons nous intéresser ici seulement au système WGS84, car il constitue le système de référence mondiale.

Ce système a été mis au point par le département de la défense des États-Unis à partir de coordonnées de points par observations Doppler sur satellites et défini à partir d'un ensemble de données : constantes fondamentales, développement du champ en harmoniques sphériques, etc... WGS84 a été déduit de la première réalisation WGS72 par une transformation à 7 paramètres. Il est utilisé pour exprimer les éphémérides radiodiffusées du GPS.

Caractéristiques :

- exactitude de l'ordre du mètre
- ellipsoïde associé : IAG-GRS80
- réalisation récente (G873) est équivalente au niveau décimétrique à ITRF94
- projection courante associée : UTM

C.3 Les systèmes de coordonnées

Les coordonnées cartésiennes

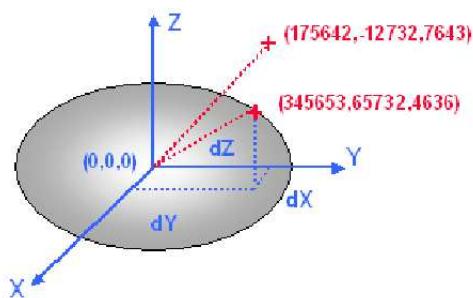


FIG. C.4 – Coordonnées cartésiennes

La localisation d'un élément dans l'espace (et donc à la surface de la Terre) peut s'exprimer sous la forme de coordonnées cartésiennes géocentriques. Les coordonnées sont alors déclinées en X,Y,Z relatives aux 3 axes d'un repère ayant son origine au centre des masses de la Terre. Ces coordonnées sont très rarement utilisées pour stocker les sources de données spatiales des SIG³, cependant elles sont souvent utilisées comme système de coordonnées intermédiaire lors des calculs de changements de systèmes géodésiques (Figure C.4).

Les coordonnées géographiques

La localisation d'un élément à la surface de la Terre peut s'exprimer sous la forme de coordonnées géographiques (Figure C.5). Les coordonnées sont alors déclinées à l'aide de deux valeurs angulaires : Longitude, et Latitude. Ces angles peuvent être exprimés dans différentes unités : degrés sexagésimaux, degrés décimaux, grades ou radians.

Des coordonnées géographiques n'ont aucun sens si elles ne sont pas accompagnées pas d'informations sur le système géodésique dans lequel elles sont exprimées. Sans information le risque est d'obtenir des différences de plusieurs dizaines de mètres entre différentes couches du SIG.

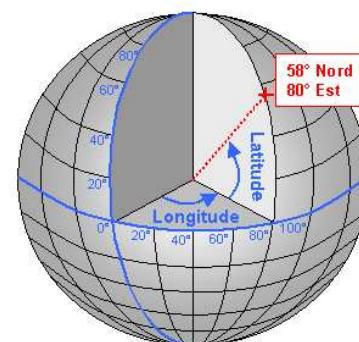


FIG. C.5 – Coordonnées géographiques

³SIG : Système d'Information Géographique, permet de gérer des données alpha-numériques spatialement localisées.

Le méridien origine

Les longitudes sont le plus souvent comptées positivement vers l'est par rapport à un méridien origine. Ce méridien origine peut être celui de Greenwich (méridien international), ou encore propre à la géodésie d'un pays (méridien de Paris pour la France). Chaque méridien origine est défini numériquement par sa longitude par rapport au méridien international.

La hauteur ellipsoïdale

Cette valeur est définie dans un système géodésique. Elle correspond à une distance entre le point considéré et le pied de la normale à l'ellipsoïde. Tous les systèmes de positionnement par satellites fournissent une hauteur ellipsoïdale et non une altitude.

Il existe des modèles de géoïdes (formules de conversion d'hauteur sur ellipsoïde vers une altitude) (type nivellement) permettant de passer de valeurs d'altitudes à des hauteurs ellipsoïdales avec une précision décimétrique.

Il est possible très localement d'assimiler des différences de hauteurs ellipsoïdales à des différences d'altitudes. Dès lors, on néglige la "pente du géoïde" (correspondant à l'écart entre la verticale et la normale à l'ellipsoïde), qui est le plus important en région montagneuse.

Les coordonnées planes

La terre étant ronde, et les cartes plates, la conversion de positions géographiques d'une surface courbe sur une surface plane nécessite l'utilisation d'une formule mathématique appelée projection cartographique. Cette transformation ne peut jamais se faire sans qu'il y ait de déformations. Pour s'en convaincre, il suffit d'essayer d'aplatir la peau d'une orange. Une fois la projection définie, la localisation peut alors s'exprimer sous la forme de coordonnées planes à l'aide de deux valeurs linéaires : X,Y. Ces deux distances à l'origine (0,0) peuvent être exprimées en : mètres, kilomètres, miles...

Il est possible de définir le type et les paramètres d'une projection dans le but de minimiser certaines déformations, on choisit alors soit :

- de conserver les surfaces : projections équivalentes
- de conserver localement les angles : projections conformes
- d'opter pour une représentation ne conservant ni les angles ni les surfaces : projections dites "aphylactiques".

En résumé, les SIG permettent de travailler avec des données stockées dans des systèmes de coordonnées géographiques ou de coordonnées projetées. Dans le premier cas, il s'agira de définir le système géodésique : l'ellipsoïde, sa position et le méridien origine. Dans le deuxième cas, vous devrez connaître le type de projection et ses paramètres, en plus du système géodésique (Figure C.6).

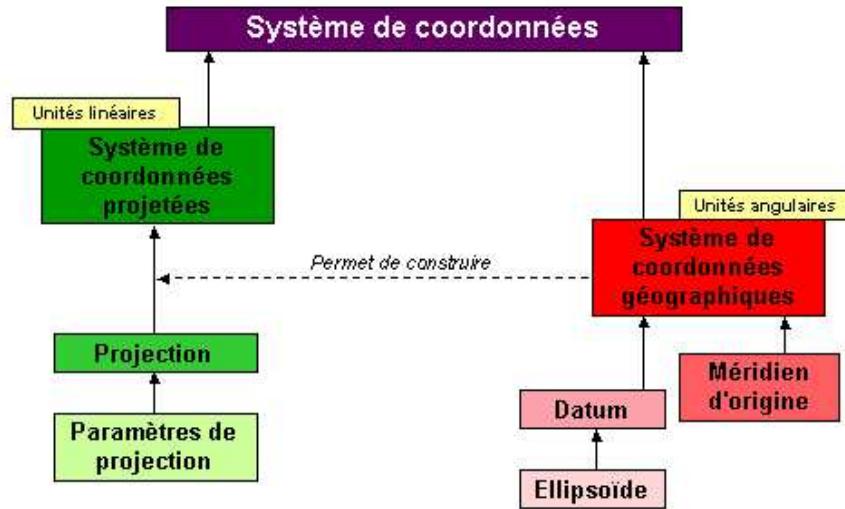


FIG. C.6 – SIG

C.4 Les projections

La projection cylindrique

La surface de projection est un cylindre tangent ou sécant au modèle de la Terre (Figure C.7).

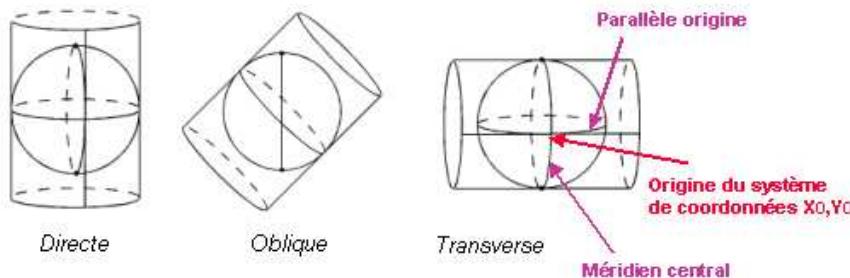


FIG. C.7 – Projections cylindriques

Les projections de Mercator sont utilisées un peu partout dans le monde sur des zones géographiques généralement restreintes. La plus courante est la projection cylindrique UTM (Universal Tranverse Mercator) qui couvre la totalité de la surface terrestre. Dans le cas de projection transverse, le méridien correspond à la ligne de tangence entre le cylindre et l'ellipsoïde, il constitue l'axe des Y du système. Le parallèle origine correspond à l'axe à partir duquel est développé le cylindre, c'est également la latitude du point origine du système, il constitue l'axe des X.

La projection conique conforme (LCC)

La grande majorité des bases spatiales utilisées en France est dans les projections françaises Lambert 1,2,3 et 4. Celles-ci sont des projections coniques conformes sécantes (Figure C.8).

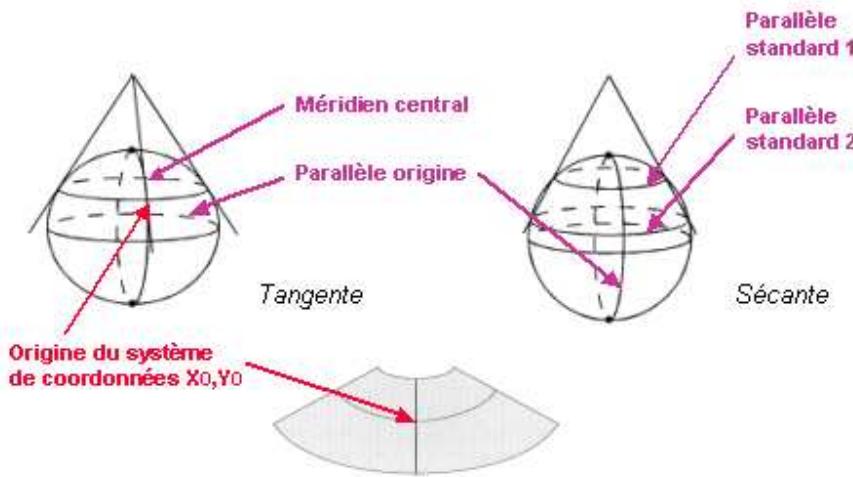


FIG. C.8 – Projections coniques

Le méridien central correspond à l'axe de symétrie à partir duquel sera développé le cône de projection. Il constitue l'axe des Y du système de coordonnées projetées. Le parallèle origine correspond, dans le cas d'une projection tangente, à la ligne de tangence entre le cône et l'ellipsoïde, il constitue l'axe des X. Dans le cas d'une projection sécante, le parallèle d'origine est situé au milieu des deux parallèles standards, les deux parallèles standards correspondent aux deux lignes d'intersection entre le cône et l'ellipsoïde.

L'origine du système de projection correspond simplement à l'intersection entre le méridien d'origine et le parallèle origine. De nombreux systèmes de coordonnées ajoutent des constantes en X et Y aux coordonnées de l'origine afin d'éviter des coordonnées négatives (Figure C.9).

Valeurs pour le calcul des coordonnées en projection Lambert de l'ellipsoïde de Clarke 1880 IGN.					
Zone Lambert	I	II	III	IV	II étendue
Zone application	53,5gr - 57gr	50,5gr - 53,5gr	47gr - 50,5gr	Corse	France entière
Latitude origine	55gr = 49°30'	52gr = 46°48'	49gr = 44°06'	46,85gr = 42°09'54"	52gr = 46°48'
Longitude origine	0gr Paris	0gr Paris	0gr Paris	0gr Paris	0gr Paris
Parallèles automécoïques	48°35'54,682"	45°53'56,108"	43°11'57,449"	41°33'37,396"	45°53'56,108"
	50°23'45,282"	47°41'45,652"	44°59'45,938"	42°46'03,588"	47°41'45,652"
X0 : False Easting	600 000 m	600 000 m	600 000 m	234,358 m	600 000 m
Y0 : False Northing	200 000 m	200 000 m	200 000 m	185 861,369 m	2 200 000 m

FIG. C.9 – Représentation des 4 zones de la projection Lambert

C.5 Les changements de systèmes de coordonnées

Dans le contexte des SIG, il est très fréquent de devoir manipuler des sources de données stockées dans des systèmes de coordonnées différents. Deux cas se présentent alors : les systèmes géodésiques identiques ou différents.

Systèmes géodésiques identiques

C'est le cas le plus simple, il suffit de reprojeter les coordonnées de la première source en coordonnées géographiques (Longitude/Latitude) et de les reprojeter dans le système de coordonnées de la deuxième source (Figure C.10).

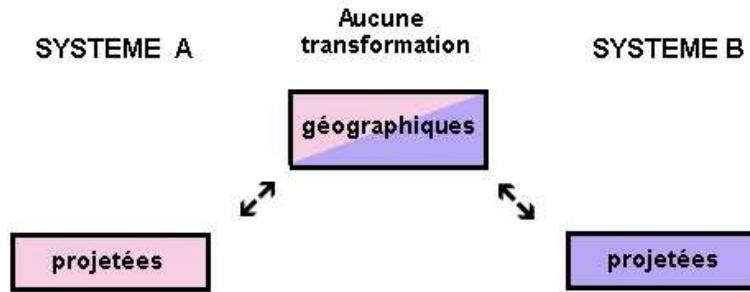


FIG. C.10 – Changement de système, cas n°1

Systèmes géodésiques différents

Dans ce cas, il est nécessaire de "déprojeter" les coordonnées de la première source en coordonnées géographiques. Ensuite, il faut réaliser un changement de système géodésique (changement de datum). Cette opération consiste à corriger les coordonnées géographiques exprimées dans le premier système pour les exprimer dans le second système.

Pour effectuer le calcul de correction des coordonnées, le passage par le système de coordonnées cartésiennes peut être nécessaire (transformation géocentrique à 7 paramètres). Il suffit ensuite de reprojeter ces coordonnées géographiques corrigées dans le second système.

Il existe plusieurs méthodes de calcul pour réaliser le changement de système géodésique, voici les méthodes les plus utilisées.

Méthode de transformation géocentrique à 3 paramètres

Cette méthode permet de prendre en compte le décalage (dX , dY et dZ) existant entre les ellipsoïdes des deux systèmes (Figure C.11).

L'équation permettant de calculer les nouvelles coordonnées cartésiennes est la suivante :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Nouveau} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Ancien} \quad (C.1)$$

La transformation géocentrique à 3 paramètres permet d'obtenir une précision de l'ordre de 1 à 5 mètres sur les coordonnées projetées.

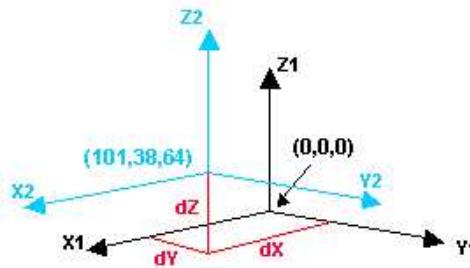


FIG. C.11 – Illustration de la transformation géocentrique à 3 paramètres

Méthode de transformation géocentrique à 7 paramètres

Cette méthode permet de réaliser une similitude 3D c'est à dire une translation du centre de l'ellipsoïde, une rotation des 3 axes ainsi d'un changement d'échelle si nécessaire. En évitant des formules mathématiques complexes, il est néanmoins possible de définir deux sens de rotation positifs autour des axes X, Y et Z. La figure C.12 est la convention utilisée par les États-Unis et l'Australie. Cette méthode est nommée "Coordinate Frame Rotation", alors qu'en Europe on utilise la convention inverse, la transformation est appelée "Position Vector" ou "Bursa-Wolf".

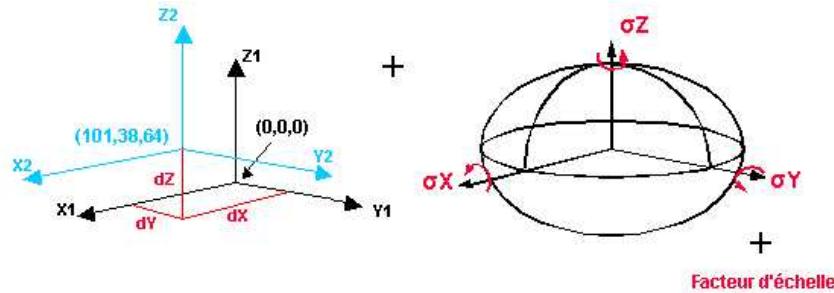


FIG. C.12 – Illustration de la transformation géocentrique à 7 paramètres

Voici l'équation permettant de calculer les nouvelles coordonnées :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Nouveau} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1 + s) \begin{bmatrix} 1 & r_z & -r_y \\ -r_z & 1 & r_x \\ r_y & -r_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Ancien} \quad (C.2)$$

La transformation géocentrique à 7 paramètres permet d'obtenir une précision inférieure au mètre.

Transformation géocentrique de Molodensky

La méthode de Molodensky permet de réaliser la transformation entre deux systèmes de coordonnées géographiques sans avoir à les convertir dans un système cartésien. Contrairement aux transformations géocentriques, cette méthode permet de passer directement d'un système géodésique local vers un autre système local. Cette méthode nécessite de connaître les décalages entre les deux systèmes ainsi que la différence entre les demi-grands axes et l'aplatissement.

Il existe également une dernière méthode permettant de passer des coordonnées planes d'un système vers un autre système, cette méthode est appelée transformation polynomiale. On ne détaillera pas celle-ci dans le présent document.

Voici le résumé des méthodes (Figure C.13) :

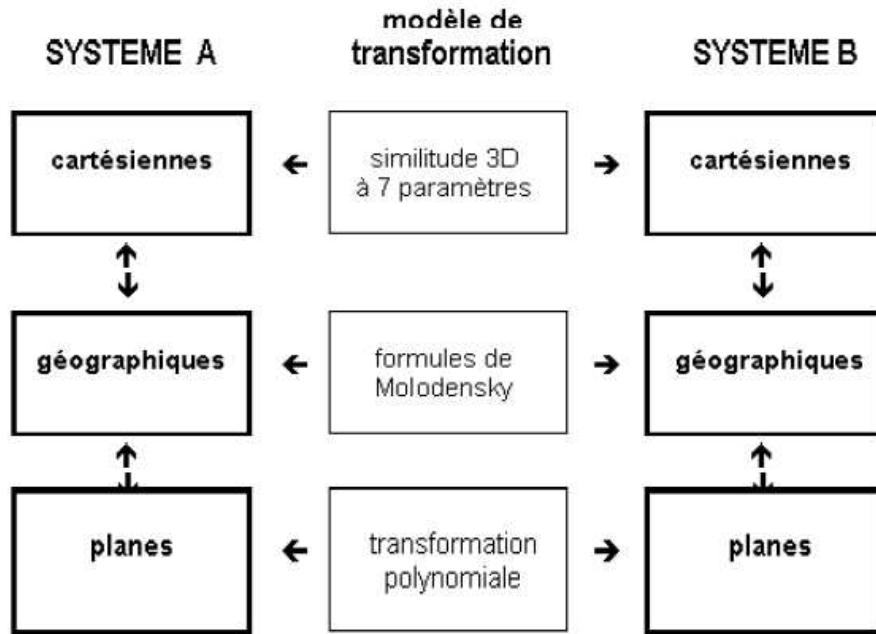


FIG. C.13 – Illustration des transformations géocentriques

Annexe D

MODIS

D.1 Spécifications

SPECIFICATIONS

Orbit:	705 km, 10:30 a.m. descending node (Terra) or 1:30 p.m. ascending node (Aqua), sun-synchronous, near-polar, circular
Scan Rate:	20.3 rpm, cross track
Swath	2330 km (cross track) by 10 km (along track at nadir)
Dimensions:	
Telescope:	17.78 cm diam. off-axis, afocal (collimated), with intermediate field stop
Size:	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Weight:	228.7 kg
Power:	162.5 W (single orbit average)
Data Rate:	10.6 Mbps (peak daytime); 6.1 Mbps (orbital average)
Quantization:	12 bits
Spatial Resolution:	250 m (bands 1-2) 500 m (bands 3-7) 1000 m (bands 8-36)
Design Life:	6 years

Primary Use	Band	Bandwidth ¹	Spectral Radiance ²	Required SNR ³
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
Ocean Color/Phytoplankton/Biogeochemistry	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
	17	890 - 920	10.0	167
Atmospheric Water Vapor	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	260

FIG. D.1 – Spécifications MODIS 1/2

Primary Use	Band	Bandwidth ¹	Spectral Radiance ²	Required NE[delta]T(K) ⁴
Surface/Cloud Temperature	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
Atmospheric Temperature	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
Cloud Properties	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
Cloud Top Altitude	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35
<hr/>				
<p>¹ Bands 1 to 19 are in nm; Bands 20 to 36 are in μm</p> <p>² Spectral Radiance values are ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$)</p> <p>³ SNR = Signal-to-noise ratio</p> <p>⁴ NE(delta)T = Noise-equivalent temperature difference</p>				
Note: Performance goal is 30-40% better than required				

FIG. D.2 – Spécifications MODIS 2/2

D.2 Les produits

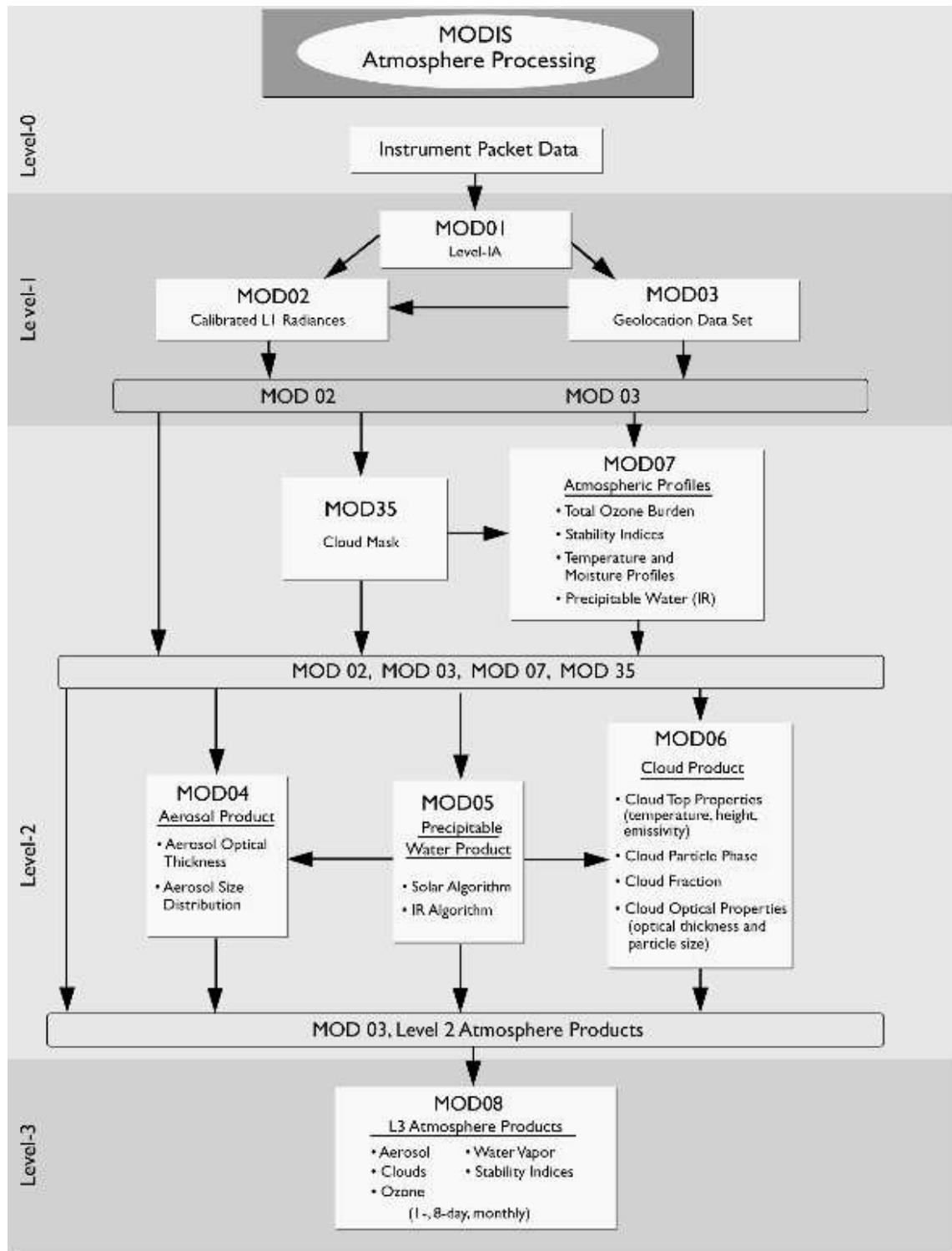


FIG. D.3 – Schéma des produits MODIS

Annexe E

Les M-estimateurs usuels

<i>type</i>	$p(x)$	$\psi(x)$	$w(x)$
<i>L2</i>	$x^2/2$	x	1
<i>L1</i>	$ x $	$sgn(x)$	$\frac{1}{ x }$
<i>L1-L2</i>	$2\left(\sqrt{1+x^2/2} - 1\right)$	$\frac{x}{\sqrt{1+x^2/2}}$	$\frac{1}{\sqrt{1+x^2/2}}$
<i>Lp</i>	$\frac{ x ^p}{p}$	$sgn(x) x ^{p-1}$	$ x ^{p-2}$
<i>Fair</i>	$c^2 \left[\frac{ x }{c} - \log\left(1 + \frac{ x }{c}\right) \right]$	$\frac{x}{1 + \frac{ x }{c}}$	$\frac{1}{1 + \frac{ x }{c}}$
<i>Huber</i>	$\begin{cases} x^2/2 & \text{si } x \leq k \\ k x - k/2 & \text{si } x \geq k \end{cases}$	$\begin{cases} x \\ k sgn(x) \end{cases}$	$\begin{cases} 1 \\ k/ x \end{cases}$
<i>Cauchy</i>	$\frac{c^2}{2} \log(1 + (x/c)^2)$	$\frac{x}{1 + (x/c)^2}$	$\frac{1}{1 + (x/c)^2}$
<i>German-McClure</i>	$\frac{x^2/2}{1+x^2}$	$\frac{x}{(1+x^2)^2}$	$\frac{1}{(1+x^2)^2}$
<i>Welsch</i>	$\frac{c^2}{2} I(1 - \exp(-(x/c)^2))$	$x \exp(-(x/c)^2)$	$\exp(-(x/c)^2)$
<i>Tukey</i>	$\begin{cases} \frac{c^2}{6} \left(1 - [1 - (x/c)^2]^3\right) & \text{si } x \leq c \\ c^2/6 & \text{si } x > c \end{cases}$	$\begin{cases} x [1 - (x/c)^2]^{1/2} \\ 0 \end{cases}$	$\begin{cases} [1 - (x/c)^2]^{1/2} \\ 0 \end{cases}$

FIG. E.1 – Estimateurs usuels

Résumé

Dans le cadre de mon projet de fin d'étude à Polytech'Orléans, j'ai réalisé une intercalibration entre images aériennes et images satellitaires MODIS.

Ce projet fut réalisé pour le laboratoire MATIS, de l'Institut Géographique National (IGN). Les recherches menées au MATIS visent à améliorer la production et la mise à jour des bases de données géographiques du territoire français.

Le but de ce projet est d'effectuer une calibration absolue des images de l'IGN, de manière approchée, à partir de données atmosphériques issues du satellite MODIS et du logiciel de transfert radiatif 6S. Cette calibration permettra notamment d'améliorer les travaux de télédétection du laboratoire. L'utilisation du logiciel 6S permet d'obtenir une représentation quasi optimale des propriétés de la surface étudiée, après la soustraction du voile atmosphérique.

Le processus mis en place a été testé sur diverses zones du territoire (rurale, urbaine, ...) afin d'en apprécier l'efficacité, notamment lors de brusques variations atmosphériques (pollution). Les résultats obtenus sont très prometteurs, la méthode employée permet d'obtenir une calibration fine, proche des grandeurs physiques réelles.

Mots clés : calibration, MODIS, géoréférencement, 6S, modèle atmosphérique, réflectance

Abstract

The project involves an intercalibration between aerial images and MODIS satellite images.

This project was realized at the MATIS laboratory, of the National Geographic Institute (IGN). The researches conducted at MATIS aim at improving the production and update of geographic data bases of France.

The purpose of this project is to realize an absolute calibration of IGN images, in an approximate way, with atmospheric data of the MODIS satellite and the software of radiative transfer 6S. This calibration will particularly improve teledetection projects of laboratory. Using 6S software allows to obtain an optimal representation of the studied surface properties, after subtraction of the atmospheric haze.

The developed algorithms were tested on various areas of the territory (rural, urban, ...), in order to verify its efficiency, notably when there are abrupt atmospheric variations (pollution). The obtained results are very promising : the employed method allows to obtain a fine calibration, close to the real physical values.

Keywords : calibration, MODIS, georeferencing, 6S, atmospheric model, reflectance