

REFLECT : logiciel de restitution des réflectances au sol pour  
l'amélioration de la qualité de l'information extraite des images  
satellitaires à haute résolution spatiale

Par

Mohamed Yacine Bouroubi

Département de géographie  
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de Ph.D.  
en Géographie

octobre 2009

© Mohamed Yacine Bouroubi, 2009

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

REFLECT : logiciel de restitution des réflectances au sol pour l'amélioration de la  
qualité de l'information extraite des images satellitales à haute résolution spatiale

présentée par :

Mohamed Yacine Bouroubi

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Lael Parrott, président-rapporteur

François Cavayas, directeur de recherche

Nicolas Tremblay, co-directeur

Jeffrey Cardille, membre du jury

Philippe Teillet, examinateur externe

Louis-André Hamel, représentant du doyen de la FES

## RÉSUMÉ

Les images satellitales multispectrales, notamment celles à haute résolution spatiale (plus fine que 30 m au sol), représentent une source d'information inestimable pour la prise de décision dans divers domaines liés à la gestion des ressources naturelles, à la préservation de l'environnement ou à l'aménagement et la gestion des centres urbains. Les échelles d'étude peuvent aller du local (résolutions plus fines que 5 m) à des échelles régionales (résolutions plus grossières que 5 m). Ces images caractérisent la variation de la réflectance des objets dans le spectre qui est l'information clé pour un grand nombre d'applications de ces données. Or, les mesures des capteurs satellitaires sont aussi affectées par des facteurs « parasites » liés aux conditions d'éclairage et d'observation, à l'atmosphère, à la topographie et aux propriétés des capteurs. Deux questions nous ont préoccupé dans cette recherche. Quelle est la meilleure approche pour restituer les réflectances au sol à partir des valeurs numériques enregistrées par les capteurs tenant compte de ces facteurs parasites ? Cette restitution est-elle la condition *sine qua non* pour extraire une information fiable des images en fonction des problématiques propres aux différents domaines d'application des images (cartographie du territoire, monitoring de l'environnement, suivi des changements du paysage, inventaires des ressources, etc.) ?

Les recherches effectuées les 30 dernières années ont abouti à une série de techniques de correction des données des effets des facteurs parasites dont certaines permettent de restituer les réflectances au sol. Plusieurs questions sont cependant encore en suspens et d'autres nécessitent des approfondissements afin, d'une part d'améliorer la précision des résultats et d'autre part, de rendre ces techniques plus versatiles en les adaptant à un plus large éventail de conditions d'acquisition des données. Nous pouvons en mentionner quelques unes :

- Comment prendre en compte des caractéristiques atmosphériques (notamment des particules d'aérosol) adaptées à des conditions locales et régionales et ne pas se fier à des modèles par défaut qui indiquent des tendances spatiotemporelles à long terme mais s'ajustent mal à des observations instantanées et restreintes spatialement ?
- Comment tenir compte des effets de « contamination » du signal provenant de l'objet visé par le capteur par les signaux provenant des objets environnant (effet d'adjacence) ? ce phénomène devient très important pour des images de résolution plus fine que 5 m;

- Quels sont les effets des angles de visée des capteurs hors nadir qui sont de plus en plus présents puisqu'ils offrent une meilleure résolution temporelle et la possibilité d'obtenir des couples d'images stéréoscopiques ?
- Comment augmenter l'efficacité des techniques de traitement et d'analyse automatique des images multispectrales à des terrains accidentés et montagneux tenant compte des effets multiples du relief topographique sur le signal capté à distance ?

D'autre part, malgré les nombreuses démonstrations par des chercheurs que l'information extraite des images satellitales peut être altérée à cause des tous ces facteurs parasites, force est de constater aujourd'hui que les corrections radiométriques demeurent peu utilisées sur une base routinière tel qu'est le cas pour les corrections géométriques. Pour ces dernières, les logiciels commerciaux de télédétection possèdent des algorithmes versatiles, puissants et à la portée des utilisateurs. Les algorithmes des corrections radiométriques, lorsqu'ils sont proposés, demeurent des boîtes noires peu flexibles nécessitant la plupart de temps des utilisateurs experts en la matière.

Les objectifs que nous nous sommes fixés dans cette recherche sont les suivants :

- 1) Développer un logiciel de restitution des réflectances au sol tenant compte des questions posées ci-haut. Ce logiciel devait être suffisamment modulaire pour pouvoir le bonifier, l'améliorer et l'adapter à diverses problématiques d'application d'images satellitales; et
- 2) Appliquer ce logiciel dans différents contextes (urbain, agricole, forestier) et analyser les résultats obtenus afin d'évaluer le gain en précision de l'information extraite par des images satellitales transformées en images des réflectances au sol et par conséquent la nécessité d'opérer ainsi peu importe la problématique de l'application.

Ainsi, à travers cette recherche, nous avons réalisé un outil de restitution de la réflectance au sol (la nouvelle version du logiciel REFLECT). Ce logiciel est basé sur la formulation (et les routines) du code 6S (Seconde Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) et sur la méthode des cibles obscures pour l'estimation de l'épaisseur optique des aérosols (aerosol optical depth, AOD), qui est le facteur le plus difficile à corriger. Des améliorations substantielles ont été apportées aux modèles existants. Ces améliorations concernent essentiellement les propriétés des aérosols (intégration d'un modèle plus récent, amélioration de la recherche des cibles obscures pour l'estimation de l'AOD), la prise en compte de l'effet d'adjacence à l'aide d'un modèle de réflexion spéculaire, la prise en compte de la majorité des

capteurs multispectraux à haute résolution (Landsat TM et ETM+, tous les HR de SPOT 1 à 5, EO-1 ALI et ASTER) et à très haute résolution (QuickBird et Ikonos) utilisés actuellement et la correction des effets topographiques l'aide d'un modèle qui sépare les composantes directe et diffuse du rayonnement solaire et qui s'adapte également à la canopée forestière. Les travaux de validation ont montré que la restitution de la réflectance au sol par REFLECT se fait avec une précision de l'ordre de  $\pm 0.01$  unités de réflectance (pour les bandes spectrales du visible, PIR et MIR), même dans le cas d'une surface à topographie variable.

Ce logiciel a permis de montrer, à travers des simulations de réflectances apparentes à quel point les facteurs parasites influant les valeurs numériques des images pouvaient modifier le signal utile qui est la réflectance au sol (erreurs de 10 à plus de 50%). REFLECT a également été utilisé pour voir l'importance de l'utilisation des réflectances au sol plutôt que les valeurs numériques brutes pour diverses applications courantes de la télédétection dans les domaines des classifications, du suivi des changements, de l'agriculture et de la foresterie. Dans la majorité des applications (suivi des changements par images multi-dates, utilisation d'indices de végétation, estimation de paramètres biophysiques, ...), la correction des images est une opération cruciale pour obtenir des résultats fiables.

D'un point de vue informatique, le logiciel REFLECT se présente comme une série de menus simples d'utilisation correspondant aux différentes étapes de saisie des intrants de la scène, calcul des transmittances gazeuses, estimation de l'AOD par la méthode des cibles obscures et enfin, l'application des corrections radiométriques à l'image, notamment par l'option rapide qui permet de traiter une image de 5000 par 5000 pixels en 15 minutes environ.

Cette recherche ouvre une série de pistes pour d'autres améliorations des modèles et méthodes liés au domaine des corrections radiométriques, notamment en ce qui concerne l'intégration de la FDRB (fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle) dans la formulation, la prise en compte des nuages translucides à l'aide de la modélisation de la diffusion non sélective et l'automatisation de la méthode des pentes équivalentes proposée pour les corrections topographiques.

**Mots-clés :** corrections radiométriques, corrections atmosphériques, corrections topographiques, code 6S, méthode des cibles obscures, effets des conditions radiométriques.

## ABSTRACT

Multi-spectral satellite imagery, especially at high spatial resolution (finer than 30 m on the ground), represents an invaluable source of information for decision making in various domains in connection with natural resources management, environment preservation or urban planning and management. The mapping scales may range from local (finer resolution than 5 m) to regional (resolution coarser than 5m). The images are characterized by objects reflectance in the electromagnetic spectrum which represents the key information in many applications. However, satellite sensor measurements are also affected by parasite input due to illumination and observation conditions, to the atmosphere, to topography and to sensor properties. Two questions have oriented this research. What is the best approach to retrieve surface reflectance with the measured values while taking into account these parasite factors? Is this retrieval a *sine qua non* condition for reliable image information extraction for the diverse domains of application for the images (mapping, environmental monitoring, landscape change detection, resources inventory, etc.)?

Researches performed in the past 30 years have yielded a series of techniques to correct the parasite factors among which some allow to retrieve ground reflectance. Some questions are still unanswered and others require still more scrutiny to increase precision and to make these methods more versatile by adapting them to larger variety of data acquisition conditions. A few examples may be mentioned:

- How to take into account atmospheric characteristics (particularly of aerosols) adapted to local and regional conditions instead of relying on default models indicating long term spatial-temporal trends that are hard to adjust to spatially restricted instantaneous observations;
- How to remove noise introduced by surrounding objects. This adjacency effect phenomenon is particularly important for image resolutions smaller than 5m;
- What is the effect of the viewing angle of the sensors that are increasingly aiming off-nadir, a choice imposed by the imperatives of a better temporal resolution or the acquisition of stereo pairs?

- How to increase the performances of automatic multi-spectral image processing and analysis techniques in mountainous high relief area by taking into account the multiple effects of topography on the remotely sensed signal?

Despite many demonstrations by researchers that information extracted from remote sensing may be altered due to the parasite factors, we are forced to note that nowadays radiometric corrections are still seldom applied, unlike geometric corrections for which commercial software possess powerful and versatile user-friendly algorithms. Radiometric correction algorithms, when available, are hard to adapt black boxes and mostly require experts to operate them.

The goals we have delineated for this research are as follow:

- 1) Develop software to retrieve ground reflectance while taking into account the aspects mentioned earlier. This software had to be modular enough to allow improvement and adaptation to diverse remote sensing application problems; and
- 2) Apply this software in various context (urban, agricultural, forest) and analyse results to evaluate the accuracy gain of extracted information from remote sensing imagery transformed in ground reflectance images to demonstrate the necessity of operating in this way, whatever the type of application.

During this research, we have developed a tool to retrieve ground reflectance (the new version of the REFLECT software). This software is based on the formulas (and routines) of the 6S code (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) and on the dark targets method to estimated the aerosol optical thickness, representing the most difficult factor to correct. Substantial improvements have been made to the existing models. These improvements essentially concern the aerosols properties (integration of a more recent model, improvement of the dark targets selection to estimate the AOD), the adjacency effect, the adaptation to most used high resolution (Landsat TM and ETM+, all HR SPOT 1 to 5, EO-1 ALI and ASTER) and very high resolution (QuickBird et Ikonos) sensors and the correction of topographic effects with a model that separate direct and diffuse solar radiation components and the adaptation of this model to forest canopy.

Validation has shown that ground reflectance estimation with REFLECT is performed with an accuracy of approximately  $\pm 0.01$  in reflectance units (for in the visible, near-infrared and

middle-infrared spectral bands) even for a surface with varying topography. This software has allowed demonstrating, through apparent reflectance simulations, how much parasite factors influencing numerical values of the images may alter the ground reflectance (errors ranging from 10 to 50%). REFLECT has also been used to examine the usefulness of ground reflectance instead of raw data for various common remote sensing applications in domains such as classification, change detection, agriculture and forestry. In most applications (multi-temporal change monitoring, use of vegetation indices, biophysical parameters estimation, etc.) image correction is a crucial step to obtain reliable results.

From the computer environment standpoint, REFLECT is organized as a series of menus, corresponding to different steps of: input parameters introducing, gas transmittances calculation, AOD estimation, and finally image correction application, with the possibility of using the fast option witch process an image of 5000 by 5000 pixels in approximately 15 minutes.

This research opens many possible pathways for improving methods and models in the realm of radiometric corrections of remotely sensed images. In particular, these include BRDF integration in the formulation, cirrus clouds correction using non selective scattering modelling and improving of the equivalent slopes topographic correction method.

**Keywords:** radiometric corrections, atmospheric corrections, topographic corrections, 6S code, dark objects method, radiometric effects.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES.....	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xxi
LISTE DES SYMBOLES.....	xxiii
REMERCIEMENTS.....	xxv
CHAPITRE I – Introduction.....	1
I-1 Le problème de restitution des réflectances au sol.....	2
I-2 La nécessité d’opérer à partir des images de réflectance.....	9
I-3 Objectifs et méthodologie.....	15
I-4 Hypothèses.....	17
I-5 Contribution à l’avancement des connaissances.....	17
I-6 Structure de la thèse.....	18
CHAPITRE II - Approche méthodologique.....	19
II-1 Les étapes de développement.....	19
II-2 Le choix des applications.....	20
II-3 Les données utilisées.....	22
II-4 Simulation de réflectance au sol de matériaux de référence dans les bandes spectrales des capteurs d’intérêt.....	24
PREMIÈRE PARTIE - Le logiciel REFLECT : aspects théoriques, calculs et structure informatique.....	26
CHAPITRE III – Aspects théoriques et calculs.....	29
III-1 Les hypothèses de base.....	29
III-2 Formulation.....	31
III-3 Modus operandi et intrants.....	37
CHAPITRE IV - Structure informatique.....	45
IV-1 Introduction.....	45
IV-2 Étapes de calcul.....	45
IV-3 Ordre de communication des programmes.....	55
DEUXIÈME PARTIE - Le logiciel REFLECT : développements spécifiques et validation..	57
CHAPITRE V - Les aérosols.....	59

V-1 Les propriétés optiques .....	59
V-2 Connaissance de l'épaisseur optique.....	72
V-3 Modèle d'extrapolation de l'AOD en fonction de la longueur d'onde .....	76
CHAPITRE VI - Estimation de l'AOD par la méthode des cibles obscures .....	79
VI-1 Introduction.....	79
VI-2 Localisation.....	80
VI-3 Application du code atmosphérique par cible obscure .....	89
VI-4 Généralisation des résultats à l'ensemble de l'image .....	90
VI-5 Comparaisons .....	92
CHAPITRE VII - Modélisation de l'effet d'adjacence.....	93
VII-1 Méthodes de calcul : état des choses .....	93
VII-2 La méthode proposée.....	97
CHAPITRE VIII - Validation du logiciel REFLECT : le cas des terrains horizontaux .....	102
VIII-1 Correction des images – paramètres atmosphériques .....	102
VIII-2 Comparaison des VNs et des réflectances au sol pour l'ensemble de la scène .....	105
VIII-3 Comparaison des VNs et des réflectances au sol des sites sélectionnés .....	107
VIII-4 Comparaison des réflectances au sol avec des mesures de spectroradiomètre .....	112
CHAPITRE IX - Intégration des corrections topographiques et validation.....	116
IX-1 Introduction.....	116
IX-1 Revue de littérature.....	116
IX-3 Modèles intégrés dans le logiciel REFLECT .....	120
IX-4 Validation .....	121
TROISIÈME PARTIE - Influence des corrections atmosphériques et topographiques sur la qualité des informations extraites des images de télédétection.....	132
CHAPITRE X - Simulation des modifications de la signature spectrale des objets par l'atmosphère et la topographie .....	133
X-1 Effets des conditions atmosphériques sur les signatures spectrales.....	133
X-2 Simulation des effets topographiques sur les signatures spectrales.....	137
CHAPITRE XI - Effet de l'atmosphère sur les applications en milieu urbain : classification et suivi des changements.....	139
XI-1 Mise à jour des cartes : évolution du couvert végétal.....	139
XI-2 Effet de l'atmosphère sur les algorithmes de classification.....	144
CHAPITRE XII - Effet de l'atmosphère sur les applications en agriculture .....	152

XII-1 Effet de l'AOD sur l'observation de la végétation.....	152
XII-2 Effet de l'humidité relative de l'air .....	155
XII-3 Influence de l'effet d'adjacence sur les indices de végétation .....	156
XII-4 Exemple avec les images Formosat-2 .....	157
CHAPITRE XIII - Effet de la topographie sur les applications en milieu forestier .....	162
XIII-1 Estimation de la biomasse forestière.....	162
XIII-2 La classification en milieu forestier .....	166
CHAPITRE XIV – Synthèse des résultats et conclusion.....	169
RÉFÉRENCES.....	176
ANNEXE 1 - Absorption du rayonnement solaire par les gaz atmosphériques .....	196
ANNEXE 2 - Diffusion du rayonnement solaire par les gaz et les aérosols.....	203
ANNEXE 3 - Diffusion multiple et Transfert Radiatif.....	214
ANNEXE 4 - Calibration des capteurs et sensibilités spectrales .....	221
ANNEXE 5 - Architecture de REFLECT autour des routines du code 6S.....	232

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Facteurs définissant les valeurs numériques des images optiques .....	2
Tableau II-1. Liste des images satellitales utilisées pour la validation de REFLECT et pour l'étude de l'influence des effets radiométriques sur les applications dans les milieux urbain, agricole et forestier (Abréviations : C.O. : recherche des cibles obscures, Cor. atm. : corrections atmosphériques, Cor. topo. : corrections topographiques, Dét. Ch. : détection des changements, Classif. : classification, VI : indices de végétation, adjac. : effet d'adjacence, Biom. : estimation de biomasse).....	23
Tableau II-2. Liste des mesures de l'épaisseur optique des aérosols réalisées par le radiomètre Microtops.....	24
Tableau II-3. Liste des mesures <i>in situ</i> de réflectance (avec un spectroradiomètre ASD) correspondant aux images Landsat-7 ETM+ utilisées pour les applications en agriculture.....	24
Tableau III-1. Longueurs d'onde de calcul des paramètres atmosphériques dans les versions de 1997 et de 2005 du code 6S.....	37
Tableau III-2. Modèles d'atmosphère utilisés dans le code 6S (fractions par type d'aérosol).....	39
Tableau V-1. Types d'atmosphères proposés dans le modèle OPAC.....	62
Tableau V-2. Exemple de calcul des paramètres atmosphériques qui dépendent de l'AOD avec le modèle d'aérosols du code 6S et celui de OPAC pour une atmosphère de type « urbain ». Calculs pour 3valeurs AOD (ciel clair : 0.05, ciel moyen : 0.2 et ciel brumeux : 0.4) et deux valeurs de <i>Hr</i> (faible :50% et élevée 90%). Les autres paramètres sont fixés à : mois : 06, jour : 30, heure : 15.5 TU, <i>H</i> : 100 m, lieu : 45°N / 73°O et capteur : ETM+.....	71
Tableau V-3. Comparaison des valeurs d'AOD mesuré (par Microtops) avec celles estimées à partir de la visibilité (AOD <sub>550,VIS</sub> ) et celles données par le réseau AERONET.....	76
Tableau VI-1. Seuils de détection et nombre de pixels de cibles obscures de type eau claire et profonde et forêt dense. Option automatique, sans division de l'image.....	88
Tableau VI-2. Nombre de pixels retenus comme cibles obscures de type eau claire et profonde et forêt dense. Option automatique avec subdivision (2x2) de l'image.....	88
Tableau VI-3. AOD provenant de diverses sources pour les dates des images utilisées. Les estimations par la méthode des cibles obscures sont de la forme moyenne ± écart type.....	92
Tableau VII-1. Fonction d'environnement pour le calcul de la réflectance de l'environnement.....	95
Tableau VIII-1. Transmittances gazeuses calculées pour les images utilisées pour la validation de REFLECT. La température et l'humidité relative de l'air ont servi à estimer le contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère.....	103
Tableau VIII-2. AOD issus de la méthode des cibles obscures et paramètres atmosphériques ( $t_{dir}^{\downarrow}$ , $t_{diff}^{\downarrow}$ , $t_{dir}^{\uparrow}$ , $t_{diff}^{\uparrow}$ , $\rho_{atm}$ et $S_{alb}$ ) correspondants calculés par REFLECT pour les images utilisées pour la validation.....	104
Tableau VIII-3. 5 <sup>ème</sup> percentiles des VNs et des réflectances au sol issues des images utilisées pour la validation de REFLECT (B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement).....	105
Tableau VIII-4. 95 <sup>ème</sup> percentiles des VNs et des réflectances au sol issues des images utilisées pour la validation de REFLECT (B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement).....	105

Tableau VIII-5. Sites utilisés pour la comparaison des réflectances au sol de matériaux sélectionnés sur les images avec leurs réflectances données par la librairie ASTER. Tous les sites sont situés dans la province de Québec, Canada (voir figure VIII-4). .....	108
Tableau VIII-6. Moyennes des VNs des matériaux sélectionnés pour la validation des corrections atmosphériques sur les images Landsat et SPOT utilisées (nd : non disponible; B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement). .....	110
Tableau VIII-7. Moyennes des réflectances au sol des matériaux sélectionnés pour la validation des corrections atmosphériques sur les images Landsat et SPOT utilisées (nd : non disponible; B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement). .....	111
Tableau VIII-8. Lieux des mesures de la réflectance (avec un spectroradiomètre ASD) réalisées par le CRDH dans des champs agricoles. ....	112
Tableau IX-1 : Modèles du facteur de réflectance bidirectionnelle. ....	117
Tableau IX-2. Modèles de composante diffuse du rayonnement solaire reçue sur plan incliné. ....	119
Tableau IX-3. VNs numériques, réflectances au sol sans correction topographique (sur plans horizontaux) et avec correction topographique (sur plans inclinés) pour les deux faces claire et foncée des trois bâtiments de l'image Ikonos de Paulatuk. ....	124
Tableau IX-4. Description des peuplements forestiers de la carte de la figure IV-5-b. ....	125
Tableau IX-5. Coefficient $\kappa$ (de l'équation 38) donnant la pente équivalente qui minimise le RMSE entre la réflectance au sol en terrains inclinés (de pente $\beta$ ) et celle calculée en terrain plat, en fonction de la différence entre l'azimut solaire et l'orientation de la surface $\delta\phi$ . ....	129
Tableau X-1. Effets additif et multiplicatif dans les bandes bleue, verte, rouge, PIR et MIR (450±15 nm, 550±20 nm, 650±20 nm, 850±25 nm et 1650±40 nm) pour quatre valeurs de l'AOD (0.05, 0.2, 0.4 et 0.6 correspondant à des ciels clair, moyen, brumeux et très brumeux, respectivement. Les autres facteurs sont fixés à : $H = 100$ m, $Hr = 40\%$ , $\theta_s = 30^\circ$ et $\phi_s = 130^\circ$ . ....	134
Tableau XI-1. Paramètres atmosphériques pour les trois conditions atmosphériques choisies pour l'image simulée à partir des matériaux de la librairie ASTER de USGS. ....	146
Tableau XI-2. Résultats de la classification supervisée obtenue par la méthode de la distance minimale et la méthode du maximum de vraisemblance avec l'utilisation des VNs et des réflectances au sol estimées par REFLECT. ....	148
Tableau XII-1. Erreurs relatives (en %) de calcul de six indices de végétation lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs d'AOD... ..	153
Tableau XII-2. Erreurs relative (en %) d'estimation du LAI à partir des indices de végétation (NDVI et MTVI) lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs de l'AOD. ....	154
Tableau XII-3. Erreurs relative (en %) de calcul de six indices de végétation lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs de $H_r$ . L'AOD est fixé à 0.1. ....	155
Tableau XII-4. Erreurs relative (en %) d'estimation du LAI à partir des indices de végétation (NDVI et MTVI) lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs de $H_r$ . L'AOD est fixé à 0.1. ....	155

Tableau XII-5. Erreur de sous-estimation du NDVI apparent par rapport au NDVI au sol et erreur supplémentaire ( $\Delta\text{NDVI}_{\text{app}}$ ) due à l'effet d'adjacence sur les pixels à proximité du sol pour le champ agricole simulé de la figure XII-4. ....	157
Tableau XII-6. Différences entre les NDVIs apparents des pixels du profil du champ et la moyennes des deux pixels centraux (numérotés 9 et 10). ....	161
Tableau XII-7. Différences entre les NDVIs corrigés des pixels du profil du champ et la moyennes des deux pixels centraux (numérotés 9 et 10). ....	161
Tableau XIII-1. Coefficients du modèle de Fournier <i>et al.</i> (2003) selon les espèces de forêts. ....	164
Tableau XIII-2. Comparaison de la biomasse moyenne par pixel calculée à partir de la carte (modèle de Fournier <i>et al.</i> 2003) et de l'image ETM+ du 08-06-2001 (modèle de Zheng <i>et al.</i> 2004) pour quatres conditions topographiques. ....	166
Tableau XIV-1. Résumé des améliorations apportées au logiciel REFLECT. ....	171
Tableau XIV-2 Synthèse des résultats sur l'effet des conditions atmosphériques et topographiques sur la qualité des informations extraites des images de télédétection. ....	173

## LISTE DES FIGURES

Figure I-1. Exemples de conditions atmosphériques sur des images Landsat-7 ETM+. Scène couvrant une partie de la Montérégie, Québec, Canada.....	5
Figure II-1. Étapes des travaux de développement de l’algorithme de correction radiométrique REFLECT et son utilisation pour l’étude de l’influence des effets atmosphériques et topographiques sur les applications de la télédétection. ....	21
Figure II-2. Application « SigSpec_Librairie » de calcul des réflectances au sol pour des matériaux répertoriés dans la librairie spectrale ASTER de USGS dans les bandes spectrales des capteurs optiques multispectraux HR et VHR ciblés par l’étude.....	25
Figure III-1. Composantes du rayonnement solaire reçues par un capteur de télédétection. ....	32
Figure III-2. Angle de visée du satellite en tenant compte de la courbure de la terre. ....	42
Figure III-3. Incidence de visée en fonction de l’angle de visée du satellite en tenant compte de la courbure de la terre. ....	43
Figure IV-1. Organigramme du logiciel REFLECT. Étapes pour le calcul de la réflectance au sol et pour l’estimation de l’AOD par le processus itératif de la méthode des cibles obscures.....	46
Figure IV-2. Fenêtre principale de l’interface graphique de REFLECT.....	47
Figure IV-3. Fenêtre de saisie des paramètres de la scène dans REFLECT .....	48
Figure IV-4. Fenêtre de calcul des transmittances gazeuses avec REFLECT. ....	49
Figure IV-5. Fenêtre de génération du masque des cibles obscures avec REFLECT. ....	50
Figure IV-6. Fenêtre de calcul de l’AOD par la méthode des cibles obscures de REFLECT.....	52
Figure IV-7. Fenêtre de génération des paramètres atmosphériques à partir du fichier scène et des intrants AOD et hauteur du lieu.....	53
Figure IV-8. Fenêtre d’application des corrections atmosphériques et/ou topographiques. ....	54
Figure IV-9. Organisation de la communication entre les programmes de REFLECT.....	56
Figure V-1. Relation entre l’AOD à 550 nm mesuré par le radiomètre Microtops en région montérégienne, Qc. (St-Jean-sur-Richelieu et St-Valentin) et l’humidité relative de l’air donnée par une station météorologique proche (L’Acadie).....	61
Figure V-2. Comparaison entre les propriétés (EX, SC et ASY) des aérosols du modèle OPAC et du code 6S..	63
Figure V-3. Fonctions de phase des aérosols du 6S et OPAC.....	64
Figure V-4. Interpolation des propriétés (EX, SC et ASY) des aérosols INSO et WASO de OPAC aux longueurs d’onde du code 6S. Illustration pour des angles de phase (ang) entre 0 et 180° .....	67
Figure V-5. Interpolation des fonctions de phase (PH) des aérosols INSO et WASO de OPAC aux longueurs d’onde du code 6S.....	68
Figure V-6. Fonctions de phase (PH) des aérosols solubles dans l’eau pour OPAC (WASO) et 6S (WATE) pour 83 angles de phase (ang) x 10 longueurs d’onde (λ).....	68
Figure V-7. Profil de pression, température, contenu en vapeur, pression partielle de saturation pour la vapeur d’eau et d’humidité relative pour une atmosphère de type « midsum » (mid-latitude summer). ....	70
Figure V-8. Modèles de prédiction de l’AOD en fonction de la visibilité.....	75

Figure V-9. Comparaison des mesures spectrales de l'AOD rapporté à sa valeur à 550 nm selon le type de région avec le modèle utilisé dans le code 6S (équation 10) avec $a=1, 2$ et $3$ .	77
Figure V-10. Comparaison des moyennes des mesures spectrales de l'AOD, rapportées à leur valeur à 550 nm, avec le modèle du code 6S ( $a=1$ ) et modèle proposé (équation 17).	78
Figure VI-1. Seuillage des histogrammes des bandes bleue, verte, rouge et PIR (image ETM+ du 08-06-2001) pour la détection des cibles obscures de type eau claire et profonde.	82
Figure VI-2. Seuillage d'histogramme des différences de VN des bandes PIR et rouge (image ETM+ du 08-06-2001) pour la détection des cibles obscures de type forêt dense.	83
Figure VI-3. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-7 ETM+. Option de seuillage automatique avec ou sans subdivision (2x2) de l'image.	85
Figure VI-4. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-5 TM. Option de seuillage automatique avec ou sans subdivision (2x2) de l'image.	86
Figure VI-5. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-7 ETM+ avec subdivision de l'image (2x2). Option de choix manuel des seuils (degré de sévérité DS=70%).	87
Figure VI-6. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-5 TM avec subdivision de l'image (2x2). Option de choix manuel des seuils (degré de sévérité DS=70%).	87
Figure VI-7. AOD estimé à partir des cibles obscures de l'image Landsat-5 TM du 17-06-1984 sans subdivision et avec subdivision (2x2) de l'image.	91
Figure VI-8. Interpolation de l'AOD issu des cibles obscures de l'image TM 17-06-1984 à l'ensemble de l'image.	91
Figure VI-9. AOD généralisé à l'ensemble de l'image après ajustement polynomial d'ordre 1 de l'AOD des cibles obscures de l'image Landsat-5 TM du 17-06-1984 en fonction des lignes et des colonnes.	92
Figure VII-1. Illustration d'exemples des fonctions d'environnement des codes 5S et 6S.	96
Figure VII-2. Représentation schématique de l'effet d'adjacence avec une réflectance d'environnement à composante spéculaire.	98
Figure VII-3. Fonction $g(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi)$ de pondération des composantes lambertienne et spéculaire de la réflectance d'environnement avec combinaisons de valeurs de $\theta_s, k_d, k_s$ et $n$ .	99
Figure VII-4. Observation de l'effet spéculaire de la réflectance de l'environnement sur les bandes PIR d'une image Landsat-7 ETM+ et d'une image SPOT 1 HRV couvrant le lac Hertel du Mont St-Hilaire, Montérégie, Québec (45° 32' 40" N ; 73° 09' 00" O).	100
Figure VII-5. Effet d'adjacence spéculaire d'un pixel brillant sur un pixel foncé selon la position des pixels par rapport à l'azimut solaire.	101
Figure VIII-1. Scène utilisée pour comparer les distributions des VN et des réflectances au sol issues de REFLECT pour 5 images Landsat-5 TM, 2 images Landsat-7 ETM+, une image SPOT 1 HRV et une images SPOT 5 HRG.	102
Figure VIII-2. Histogrammes des VN des images utilisées pour la validation des corrections atmosphériques de REFLECT.	106

Figure VIII-3. Histogrammes des réflectances au sol calculées par REFLECT pour les images utilisées pour la validation des corrections atmosphériques de REFLECT. ....	107
Figure VIII-4. Localisation des sites utilisés pour la comparaison des réflectances au sol des matériaux sélectionnés sur les images avec leurs réflectances données par la librairie ASTER (a : scène globale avec pixels d'asphalte et de fleuve; b et c : lacs; d : conifères et de feuillus; e : gazon; voir tableau VIII-5 pour plus de détails sur les sites).....	109
Figure VIII-5. Réflectances spectrales des points de mesure par spectroradiomètre ASD dans les champs agricoles indiqués dans le tableau VIII-8. Les bandes spectrales bleue, verte, rouge et PIR de ETM+ sont indiquées par des traits bleus, verts, rouges et mauves, respectivement. ....	113
Figure VIII-6. Localisation sur les images Landsat-7 ETM+ des parcelles dans lesquels les mesures ASD ont été réalisées (voir tableau II-3 pour les coordonnées des parcelles).....	113
Figure VIII-7. Comparaison des réflectances estimées par REFLECT à partir des images Landsat-7 ETM+ avec les mesures (ASD) réalisées au moment du passage du satellite.....	114
Figure VIII-8. Localisation et réflectance spectrale mesurée (le 17 juin 2003 par ASD) du toit de la bâtisse de Québecor située à St-Jean-Sur-Richelieu (45° 19' 36" N; 73° 17' 17" O). Trois types de surfaces ont été identifiées sur le toit : du PVC propre (60% de la surface), du PVC sale (25% de la surface) et de la gravelle (15% de la surface). ....	115
Figure VIII-9. Comparaison des réflectances estimées par REFLECT à partir de cinq images Landsat-7 ETM+ et une image EO-1 ALI avec les mesures ASD pour le toit brillant de la bâtisse de Québecor de St-Jean-Sur-Richelieu, Québec. ....	115
Figure IX-1. Éclairage et observation d'une surface plane et d'une surface inclinée orientée vers ou à l'opposé du soleil. ....	117
Figure IX-2. Observation satellitaire d'une cible en terrain horizontal et en terrain incliné. ....	120
Figure IX-3. Image Ikonos de la région de Paulatuk, territoire du Nord Ouest, illustrant l'effet de la différence d'éclairage sur des toitures inclinées. Centre de la scène 69° 20' 30" N, 124° 04' 00" O; angle zénithal solaire 60.06°; azimuth solaire 182.75°; angle de visée 25.49°; azimuth de visée = 287.78°; atmosphère claire (AOD=0.05). ....	122
Figure IX-4. Principe de la déduction de la pente des toitures de la différence de largeur des demi-toitures due à la visée oblique du satellite Ikonos.....	123
Figure IX-5. Données utilisées pour tester le modèle de correction topographique en milieu forestier. Site de Tarn, France (43° 39' N; 02° 42' E). Composé coloré dans (a) : PIR dans R; rouge dans V; vert dans B. ....	125
Figure IX-6. Effets topographiques sur la distribution des VN de la bande PIR pour les trois images SPOT 1 de Tarn, France. Les VN ont été classés en 4 catégories : (a) pente faible orientée vers le soleil, (b) pente faible orientée à l'opposé du soleil, (c) pente élevée orientée vers le soleil et (d) pente élevée orientée à l'opposé du soleil. ....	126
Figure IX-7. Comparaison des VN selon les dates : illustration des effets du gain du capteur et de l'angle zénithal du soleil (angle d'éclairage) dans la bande PIR des trois les images. ....	127
Figure IX-8. Comparaison des VN selon les conditions d'éclairage : illustration des effets topographiques sur la bande PIR des trois images.....	127

Figure IX-9. Réflectances au sol pour les 3 image SPOT 1 de Tarn, France, en fonction de la pente et de l'orientation des surfaces. Cas (a) sans corrections topographiques et (b) avec corrections topographiques par le modèle développé pour les surfaces planes. ....	128
Figure IX-10. Représentation schématique des ombrages dans une canopée forestière située sur des terrains inclinés orientés vers et contre le soleil.....	129
Figure IX-11. Réflectances au sol pour les 3 images SPOT 1 de Tarn, France, en fonction de la pente et de l'orientation des surfaces. Corrections topographiques par : (a) le modèle de Minnaert et (b) celui développé et modifié pour les forêts (modèle des pentes équivalentes).....	130
Figure IX-12. Coefficient multiplicatif ( $\kappa$ ) de calcul des pentes équivalentes pour la correction des effets topographiques affectant les canopées forestières, en fonction de la différence entre l'orientation du terrain et l'azimut solaire ( $\delta\varphi$ ) .....	131
Figure IX-13. Exemples de réduction des effets topographiques par le modèle des pentes équivalentes sur la bande PIR de l'image SPOT 1 acquise le 05-09-1988 sur Tarn, France.....	131
Figure X-1. Réflectance apparente ( $R^{sat}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{sol}$ ) pour les bandes bleue, verte, rouge, PIR et MIR (450±15 nm, 550±20 nm, 650±20 nm, 850±25 nm et 1650±40 nm) et quatre valeurs d'AOD. Les autres facteurs sont : $H = 100$ m, $H_r = 40\%$ , $\theta_s = 30^\circ$ et $\varphi_s = 130^\circ$ .....	134
Figure X-2. Réflectance apparente ( $R^{sat}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{sol}$ ) pour les bandes spectrales bleue, verte, rouge, PIR et MIR (450±15 nm, 550±20 nm, 650±20 nm, 850±25 nm et 1650±40 nm) et pour six niveaux d'altitude $H$ . L'AOD est fixé à 0.2 et $H_r$ à 40%.....	135
Figure X-3. Réflectance apparente ( $R^{sat}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{sol}$ ) pour les bandes spectrales bleue, verte, rouge, PIR et MIR (celles de ETM+) et pour quatre niveaux d'humidité relative de l'air. L'AOD est fixé à 0.2 et $H$ à 100 m.....	136
Figure X-4. Signatures spectrales de matériaux extraits de la librairie ASTER de USGS et leur modification par l'atmosphère pour deux valeurs de l'AOD (0.05 et 0.5). $H_r$ est fixé à 40%. ....	137
Figure X-5. Réflectance apparente ( $R^{sat}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{sol}$ ) pour les bandes spectrales bleue, verte, rouge, PIR et MIR (celles de ETM+) et pour six conditions topographiques. L'AOD est fixé à 0.2, $H$ à 100 m, l'angle zénithal du soleil à $30^\circ$ et la visée est du nadir. ....	138
Figure XI-1. Scène utilisée pour l'étude de l'évolution du couvert végétal (vraies couleurs). ....	139
Figure XI-2. Évolution du NDVI calculé à partir des VN et des réflectances au sol entre le début et la fin de l'été. L'écart entre les années des paires d'images ne dépasse pas 3 ans.....	140
Figure XI-3. Évolution sur une décennie du NDVI calculé à partir des VN et des réflectances au sol à l'aide de REFLECT. Les paires d'images sont acquises approximativement à la même période de la saison.....	142
Figure XI-4. Évolution sur deux décennies du NDVI calculé à partir des VN et des réflectances au sol à l'aide de REFLECT. Les paires d'images sont acquises à la même période de la saison. ....	143
Figure XI-5. Exemple des changements de l'occupation du sol en deux décennies sur la rive Nord de Montréal. Les changements sont caractérisés essentiellement par la transformation des zones de végétation en zones résidentielles. ....	143
Figure XI-6. Effet de l'atmosphère sur les réflectances apparentes dans les plans bleu-vert et rouge-PIR. Combinaison de trois valeurs de réflectance au sol par bande spectrale et deux valeurs de l'AOD (0.1 et 0.3). Les autres conditions sont fixées à : $H = 100$ m, $H_r = 40\%$ , $\theta_s = 25^\circ$ et $\varphi_s = 130$ . ....	144

Figure XI-7. Signatures spectrales des matériaux utilisés pour la constitution et la classification d'une image simulée. ....	145
Figure XI-8. Classification d'une image simulée (4 bandes spectrales et huit matériaux) en utilisant les réflectances au sol et les réflectances apparentes simulées à l'aide de REFLECT pour trois conditions atmosphériques. (a) : bandes bleue, verte, rouge et PIR de l'image des réflectances au sol; (b) : bandes bleue, verte, rouge et PIR de l'image des réflectances apparentes; (c) : classification de l'image des réflectances au sol; (d) : classification de l'image des réflectances apparentes. ....	146
Figure XI-9. Scène utilisée pour les classifications supervisées et non supervisées des images Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et du 11-08-2001, SPOT 5 HRG du 29-07-2006 et de leurs combinaisons (composé coloré : PIR dans R, MIR dans V et rouge dans B). ....	147
Figure XI-10-a. Carte issue de la classification dirigée des VN de l'image Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001. ....	149
Figure XI-11. Comparaison des résultats de la classification dirigée de la combinaison des images Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et SPOT 5 du 29-07-2006 en utilisant les VN et les réflectances au sol. Site illustré : île Ste-Thérèse au nord-est de Montréal, Québec (45° 41' N; 73° 28' O). ....	150
Figure XI-12. Classification non dirigée de la combinaison des trois images (Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et du 11-08-2001 et SPOT 5 HRG du 29-07-2006) en utilisant les images brutes (VN) et corrigées (réflectances au sol). ....	151
Figure XII-1. Indices de végétation apparents (avec AOD = 0.05, 0.2, 0.4 ou 0.6) v.s. indices de végétation au sol pour des surfaces couvertes de X% de végétation et de (100-X)% de sol (avec X = 20%, 40%, 60%, 80% ou 100%). ....	153
Figure XII-2. LAI estimé à partir des NDVIs et des MTVIs au sol et apparents pour quatre valeurs de l'AOD et cinq surfaces végétalisées (20%, 40%, 60%, 80% et 100%). ....	154
Figure XII-3. Simulation d'un champ agricole couvert de végétation et entouré de sol. ....	156
Figure XII-4. NDVI calculé à partir des réflectances apparentes d'un champ agricole simulé avec effet de l'adjacence du sol sur la végétation. Quatre valeurs de l'AOD sont considérées. ....	157
Figure XII-5. Exemple d'un champ agricole bordé de surfaces brillantes dans la bande rouge sur l'image Formosat-2 (vraies couleurs) du 05-06-2005. Coordonnées du lieu : 45° 33' 30" N; 73 ° 25' 30" O. ....	158
Figure XII-6. Profil du NDVI apparent extrait sur la largeur du champ agricole sélectionné sur les images Formosat-2 utilisées. ....	159
Figure XII-7. Exemple de réflectances apparentes et de réflectances d'environnement dans les bandes rouge et PIR pour le champ agricole sélectionné sur les images Formosat-2 utilisées. ....	159
Figure XII-8. Profil du NDVI corrigé extrait sur la largeur du champ agricole sélectionné sur les images Formosat-2 utilisées. ....	160
Figure XIII-1. Image Landsat-7 ETM+ (du 08-06-2001) d'Oka utilisée pour le calcul de la biomasse forestière et les paramètres topographiques (pente et orientation) correspondantes. ....	162
Figure XIII-2. VN des bandes rouge et PIR et NDVI des pixels inclinés de 10° ou plus et orientés de 0°, 90° ou 180° ( $\pm 15^\circ$ ) par rapport à l'azimut du soleil. L'image utilisée est la Landsat-7 acquise le 08-06-2001 sur Oka, Laurentides, Québec, illustrée sur la figure XIII-1. ....	163

Figure XIII-3. Données de la carte forestière couvrant la région d’Oka, Laurentides, Québec. Les codes JIN et VIN dans la légende correspondent aux désignations « jeune inéquienne » (origine < 80 ans) et « vieux inéquienne » (origine > 80 ans), respectivement. ....	164
Figure XIII-4. Biomasse forestière estimée à partir de la carte forestière par le modèle de Fournier <i>et al.</i> 2003. ....	165
Figure XIII-5. Effets de la topographie sur les plans bleu-vert et rouge-PIR pour trois orientations de la surface inclinée. Les autres conditions sont fixées à : AOD=0.1, pente=30°, $H = 100$ m, $H_r = 40\%$ , $\theta_s = 25^\circ$ et $\varphi_s = 130$ . ....	167
Figure XIII-6. Classification des pixels de la forêts d’Oka se trouvant sur des terrains inclinés (>10°) sur l’image Landsat-7 du 08-06-2001 à partir des réflectances rouge et PIR calculées avec et sans corrections topographiques. Les classes 1 à 4 correspondent respectivement à des valeurs de réflectance PIR sans correction topographique de 0.376, 0.467, 0.519 et 0.574 et de 0.358, 0.455, 0.502 et 0.5440 avec correction topographique. ....	168

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS**

5S : Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire.  
6S : Seconde Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire.  
AAC : Agriculture et Agroalimentaire Canada.  
ADEOS : ADvanced Earth Observing Satellite.  
AERONET : AERosol RObotic NETwork.  
AFRI : Aerosol FRee vegetation Index.  
AGB : Above Ground Biomass.  
ALI : Advanced Land Imager.  
AOD : Aerosol Optical Depth (épaisseur optique des aérosols).  
ARVI : Atmospherically Resistant Vegetation Index.  
ASD : Analytical Spectral Devices (spectroradiomètre).  
ASTER : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.  
AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer.  
CAM5S : Canadian Advanced Modified 5S.  
CARTEL : Centre d'Applications et de Recherches en TÉLédétection.  
CRDH : Centre de Recherche et Développement en Horticulture.  
DVI : Difference Vegetation Index.  
EO-1 : Earth Observing mission 1.  
ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus.  
ÉTR : Équation de Transfert Radiatif.  
FDRB : Fonction de Distribution de la Réflectance Bidirectionnelle.  
HITRAN : HIgh resolution atmospheric TRANsmission.  
HR : Haute Résolution.  
HRG : Haute Résolution Géométrique.  
HRV : Haute Résolution Visible.  
HRVIR : Haute Résolution Visible et InfraRouge.  
INSO : aérosol de type water-INSOLuble de opac.  
LAI : Leaf Area Index (indice foliaire).  
LOWTRAN : LOW resolution atmospheric TRANsmission.  
LUTs : Look-Up Tables.  
M5S : Modified 5S.

MIAM : aérosol de type MIneral Accumulation Mode de opac.  
MICM : aérosol de type MIneral Coagulation Mode de opac.  
MINM : aérosol de type MIneral Nucleation Mode de opac.  
MIR : Moyen InfraRouge.  
MISR : Multi-angle Imaging SpectroRadiometer.  
MITR : aérosol de type MIneral-TRansported de opac.  
MNA : Modèle Numérique d'Altitude.  
MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.  
MODTRAN : MODerate resolution atmospheric TRANsmission.  
MSAVI : Modified Soil Adjusted Vegetation Index.  
MSS : MultiSpectral Scanner.  
MTVI : Modified Triangular Vegetation Index.  
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index.  
OMM : Office Mondiale de la Météorologie.  
OPAC : Optical Properties of Aerosols and Clouds.  
PIR : Proche InfraRouge.  
POLDER : POLarisation and Directionality of the Earth Reflectance.  
RMSE : Root Mean Square Error.  
RVI : Ratio Vegetation Index.  
SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index.  
SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre.  
SSAM : aérosol de type Sea Salt Accumulation Mode de opac.  
SSCM : aérosol de type Sea Salt Ccoagulation Mode de opac.  
SULF : aérosol de type gouttelettes de sulfates de opac.  
TASIC : Transformation of Atmospheric and Solar Illumination Conditions.  
TM : Thematic Mapper.  
TSV : Temps Solaire Vrai.  
USGS : United States Geological Survey.  
UTM : Universal Transverse Mercator.  
VI(s) : Indice(s) de Végétation.  
VN(s) : Valeur(s) Numérique(s).  
WASO : aérosol de type WAter SOLuble de opac.  
WATE : aérosol de type WATER soluble du code 6S.

## LISTE DES SYMBOLES

$AOD_{550}$  : épaisseur optique des aérosols à 550 nm.

ASY : Coefficient d'asymétrie des particules d'aérosol.

DS : Degré de sévérité dans le choix des cibles obscures par l'option semi-automatique de REFLECT.

$E_0$  : Éclairement solaire à l'extérieur de l'atmosphère.

$E_{dir}$ ,  $E_{diff}$  : Éclairement solaire direct et diffus, respectivement.

EX : Coefficient d'extinction des particules d'aérosol.

$F(r)$  : Fonction cumulative de l'environnement (intégrale de  $f(r)$  selon  $r$ ).

$H$  : Altitude du lieu.

$H_r$  : Humidité relative de l'air.

$L_{atm}$  : Luminance de l'atmosphère qui se retrouve dans l'angle de visée du capteur.

$L_{env}$  : Luminance de l'environnement qui se retrouve dans l'angle de visée du capteur.

$L^{sat}$  : Luminance apparente au niveau du satellite.

$L_{sol}$  : Luminance au sol de la cible visée.

PH : Fonction de phase des particules d'aérosol.

$S_{alb}$  : Albédo sphérique de l'atmosphère.

SC : Coefficient de diffusion des particules d'aérosol.

SS : Sensibilité spectrale du capteur.

$T^\downarrow$  : Transmittance de diffusion de l'atmosphère dans le trajet descendant.

$T^\uparrow$  : Transmittance de diffusion de l'atmosphère dans le trajet ascendant.

$T_a$  : Température ambiante.

$T_{gaz}$  : Transmittance gazeuse totale (trajet descendant et ascendant).

$T_{gaz}^{AG}$  : Transmittance gazeuse des autres gaz que la vapeur d'eau.

$T_{gaz}^{AG+H_2O}$  : Transmittance gazeuse totale  $T_{gaz}$ .

VIS : Visibilité.

$f(r)$  : Fonctions de l'environnement (dérivée de  $F(r)$  selon  $r$ ).

$g_{ciel}$  : Coefficient de modulation de l'éclairement solaire diffus reçue par une surface inclinée.

$i_s$  : Angle d'incidence du soleil.

$i_v$  : Angle d'incidence de la visée du capteur.

$t_{diff}^{\uparrow}$ ,  $t_{diff}^{\downarrow}$  : Transmittances de diffusion du signal diffus dans les trajets ascendant et descendant, respectivement.

$t_{diff}^R$  : transmittance de diffusion de Rayleigh par les molécules des gaz atmosphériques.

$t_{diff}^A$  : transmittance de diffusion par les aérosols.

$t_{dir}^{\uparrow}$ ,  $t_{dir}^{\downarrow}$  : Transmittances de diffusion du signal direct dans les trajets ascendant et descendant.

$w$  : Contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère (intégré le long de la colonne atmosphérique).

$\alpha$  : Orientation d'une surface inclinée.

$\beta$  : Pente d'une surface inclinée.

$\delta\varphi$  : Différence entre l'angle azimutal du soleil et l'orientation d'une surface inclinée.

$\varphi_s$  : Angle azimutal du soleil.

$\varphi_v$  : Azimut de visée du capteur.

$\kappa$  : Coefficient de calcul des pentes équivalentes du modèle de correction topographique de REFLECT.

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$\rho_{atm}$  : Réflectance atmosphérique appelée aussi réflectance de parcours.

$\rho_B$  : Composante bidirectionnelle de la réflectance  $\rho_{sol}$ .

$\rho_{diff}$  : Réflectance du sol face au rayonnement diffus.

$\rho_{dir}$  : Réflectance du sol face au rayonnement solaire direct.

$\rho_{env}$  : Réflectance de l'environnement.

$\rho_{env}^H$  :  $\rho_{env}$  en considérant les pixels de l'environnement horizontaux.

$\rho_{HD}$  : Composante hémisphérique-directionnelle de la réflectance  $\rho_{sol}$ .

$\rho^{sat}$  : Réflectance de la cible au niveau du satellite.

$\rho_{sol}$  : Réflectance au sol de la cible.

$\theta_s$  : Angle zénithal du soleil.

$\theta_v$  : Angle de visée du capteur par rapport à la normale du lieu.

$\tau$  : Épaisseur optique (en général).

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon directeur François Cavayas, responsable du laboratoire de télédétection du département de géographie de l'Université de Montréal. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour l'encadrement, le soutien et la confiance qu'il m'a accordé tout au long de cette recherche.

Mes sincères remerciements vont également à mon co-directeur, Nicolas Tremblay du Centre de Recherche et Développement en Horticulture d'Agriculture et Agroalimentaire Canada pour son support, sa gentillesse et pour l'intérêt constant qu'il a accordé à cette recherche.

Je remercie très chaleureusement mon épouse pour sa patience et ses encouragements tout au long des années qui ont mené à l'achèvement de ce travail.

Mes remerciements seraient incomplets si j'oubliais tous mes collègues et amis qui m'ont apporté, de près ou de loin, leur aide et leur sympathie.

## CHAPITRE I – Introduction

Le développement durable est un enjeu majeur à court et à long terme. L'adoption de cette nouvelle vision permet d'assurer le progrès tout en garantissant la saine gestion des ressources naturelles, la préservation de l'environnement, le contrôle de la pollution, la sauvegarde de la biodiversité et, de manière générale, la protection de la nature et de la vie sur terre.

La prise de décision en matière d'environnement, de gestion des ressources naturelles et de gestion des régions métropolitaines s'appuie de plus en plus sur des images de télédétection à haute résolution spatiale (30 m ou plus fine), notamment celles acquises à partir de l'espace (Teillet *et al.* 2004; Kalluri *et al.* 2003). De manière générale, les informations générées pour les applications courantes des images concernent les conditions du couvert végétal (type de couverture, suivi de phénologie, estimation de biomasse, détection des dommages, évaluation des rendements, état des forêts, ...), l'occupation du sol (mise à jour des cartes, identification ou recherche de matériaux, physique et chimie des sols, ...) ou l'inventaire des ressources naturelles. Il s'agit du passage d'une échelle relative (niveaux de gris) de grandeurs physiques mesurées (luminances) à une échelle de grandeurs biophysiques (biomasse, couverture foliaire, ...) ou à un système de classes (ex. type d'occupation du sol). Ce passage se fait généralement à l'aide de la combinaison d'un ensemble de modèles, d'algorithmes, d'équations et/ou de méthodes de classification. L'hypothèse de base est que le signal enregistré par le capteur est directement lié à l'état et/ou la nature des objets visés au sol. En fonction des résolutions spatiale, spectrale et radiométrique des capteurs, il est possible de discriminer à distance différents états d'une classe d'objets (ex. peuplements forestiers selon leur densité) ou des classes d'objets entre elles (ex. différents types de matériaux à la surface).

Dans le cas des capteurs satellitaires opérant sur la base du rayonnement solaire réfléchi par les objets, auxquels nous nous intéressons dans cette recherche, la grandeur physique qui permet de faire le passage à des grandeurs biophysiques ou à des classes d'objets est la réflectance. La variation de la réflectance des objets dans le spectre (signature spectrale) est l'information clé pour un grand nombre d'applications des images. Or, les mesures des capteurs dépendent, en plus des réflectances des objets, d'un bon nombre de facteurs, souvent interreliés, que nous avons résumés au tableau I-1.

Tableau I-1. Facteurs définissant les valeurs numériques des images optiques

Atmosphère	Soleil	Terrain	Réflectivité du sol	Capteur
- Composition et propriétés optiques des gaz et des aérosols - Nuages	- Position dans le ciel lors de l'acquisition des données - Éclairement spectral	- Altitude du lieu - Relief topographique	- Réflectance - Anisotropie de réflexion - Réflectivité du milieu environnant l'objet visé	- Étalonnage - Bandes spectrales - Angle de visée - Altitude

Deux questions nous ont préoccupées dans cette recherche. Quelle est la meilleure approche pour restituer les réflectances au sol à partir des valeurs numériques enregistrées par les capteurs tenant compte des facteurs du tableau I-1 ? Cette restitution est-elle la condition *sine qua non* pour extraire une information fiable des images en fonction des problématiques des applications mentionnées précédemment ? Ces questions sont abordées succinctement dans ce qui suit à la lumière des travaux publiés dans ces domaines, ce qui nous permettra de mieux baliser notre recherche.

## I-1 Le problème de restitution des réflectances au sol

### I-1-1 Description du problème

Pour chacune des bandes spectrales d'opération du capteur, nous pouvons décrire mathématiquement les relations entre les valeurs numériques enregistrées et les réflectances au sol par un système de trois équations faisant intervenir les facteurs signalés au tableau I-1 (Tanré *et al.* 1979; Cavayas *et al.* 1984, Vermote 1997-a) :

$$VN = Gain L^{sat} + Offset \quad (1)$$

$$L^{sat} = T^{\uparrow} L_{sol} + L_{atm} + L_{env} \quad (2)$$

$$L_{sol} = t_{dir}^{\downarrow}(\theta_s) E_s(\theta_s) \rho_{dir}(\theta_s) + \iint_{\theta_i, \varphi_j} t_{diff}^{\downarrow}(\theta_i, \varphi_j) E_s(\theta_i, \varphi_j) \rho_{diff}(\theta_i, \varphi_j) d\theta_i d\varphi_j + \sum_{n=1}^{\infty} T_{tot}^{\downarrow} E_s \overline{\rho_{diff}} S_{alb} \quad (3)$$

La première équation exprime la transformation de la luminance (le signal) qui parvient au capteur en une échelle relative de niveaux de gris (habituellement codés sur 8 bits ou plus) avec des coefficients d'étalonnage appelés gains et offsets du capteur. C'est la méthode couramment employée avec les capteurs optiques (étalonnage linéaire). Les coefficients

« Gain » et « Offset » sont déterminés lors des opérations de pré-lancement mais leurs valeurs dérivent au fil des années avec l'âge du système optique, en particulier les détecteurs. Certaines méthodes sont proposées pour apporter des correctifs post-lancement (Teillet 1997; Teillet *et al.* 1997-a).

La deuxième équation décrit le signal au niveau du satellite en fonction du signal au sol. Le coefficient  $T^\uparrow$  (transmittance dans le trajet ascendant) exprime la perte de l'intensité du signal du sol après son passage par l'atmosphère causée par les phénomènes de diffusion et d'absorption atmosphériques (effet atmosphérique multiplicatif). Ces pertes dépendent non seulement de la composition de l'atmosphère et des propriétés optiques de ses constituants mais aussi de l'angle de visée du capteur. Le coefficient  $L_{atm}$  représente un signal parasite dû à la réflexion de l'atmosphère qui dépend aussi de sa composition et de la position du soleil et du capteur (effet additif atmosphérique). Pour une atmosphère homogène horizontalement, les coefficients  $T^\uparrow$  et  $L_{atm}$  sont constants pour l'ensemble de l'image. Cependant pour des images couvrant plusieurs km<sup>2</sup>, l'homogénéité horizontale de l'atmosphère n'est pas toujours garantie. Le coefficient  $L_{env}$  exprime la « contamination » du signal provenant de l'objet visé par les signaux provenant de l'environnement (effet d'adjacence). Ces signaux dépendent des propriétés de diffusion atmosphérique, de la réflectivité de l'environnement ainsi que de son niveau de brillance. L'effet d'adjacence peut varier d'un pixel à l'autre de l'image peu importe l'état de l'atmosphère. Compte tenu du fait que la distribution verticale des molécules et des aérosols est variable, l'atmosphère n'aura pas le même impact sur le signal mesuré pour un objet se situant au niveau de la mer que pour un autre se trouvant à une certaine altitude.

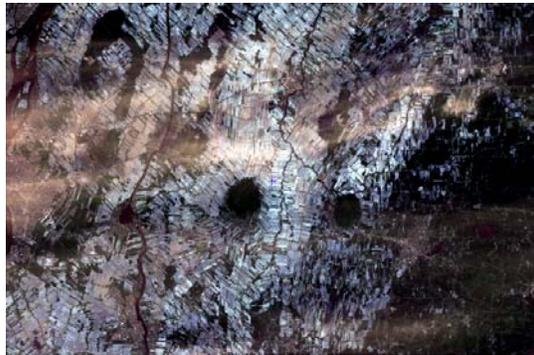
La troisième équation exprime le signal provenant du sol. Ce signal est la somme des trois composantes : a) celle provenant de la réflexion du rayonnement solaire direct (premier terme de droite) qui parvient à la surface ; lui-même variable selon l'angle d'éclairement  $\theta_s$ , ainsi que la transparence atmosphérique du trajet descendant  $t_{dir}^\downarrow$  ; b) celle provenant de la réflexion du rayonnement diffus du ciel (deuxième terme de droite), provenant de toutes les directions  $(\theta_i, \varphi_i)$  du trajet descendant, variable selon la composition atmosphérique et l'éclairement solaire ( $t_{diff}^\downarrow$ ) ; c) et celle provenant de la réflexion du rayonnement diffus du ciel originaire des réflexions multiples dans le système terre-atmosphère (troisième terme de droite); variable selon la réflectivité hémisphérique du sol ( $\overline{\rho_{diff}}$ ) et celle de l'atmosphère ( $S_{alb}$ ). Pour un terrain à faible relief topographique, le signal est dominé par la réflexion du sol face au

rayonnement solaire direct ( $\rho_{dir}$ ), les autres sources d'éclairement ne représentent que quelques 10% à 15% de l'éclairement total. La capacité de réflexion du terrain peut être variable en fonction de l'angle d'éclairement solaire et de l'angle de visée (réflectance bidirectionnelle). C'est le cas d'un objet anisotrope et cette variabilité est décrite par la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (FDRB). Les deux autres composantes du signal sont caractérisées par la réflectance hémisphérique-directionnelle ( $\rho_{diff}$ ) qui n'est égale à la réflectance bidirectionnelle que si l'objet est isotrope. La présence d'un relief accidenté modifie considérablement la situation. À la limite, la surface n'est éclairée que par le rayonnement diffus du ciel (éléments dans l'ombre), lui-même variable selon la topographie du terrain (masquage des parties du ciel, réflexions directes d'un versant à l'autre, ...). Pour des objets à réflexion anisotrope, la topographie, en modifiant localement les angles d'incidence et de visée du capteur, ajoute une variation supplémentaire aux signaux provenant des mêmes objets.

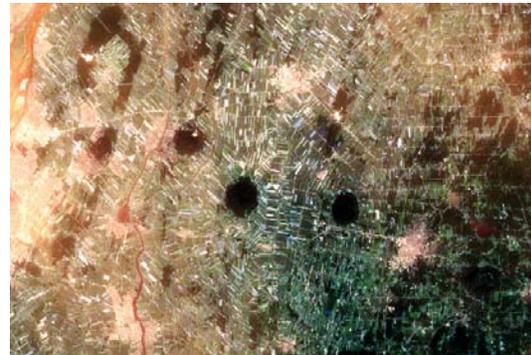
Il devient clair de l'équation (3) que la séparation des signaux provenant du sol selon le type de réflectance est un problème qu'on ne peut pas résoudre par télédétection, même si l'on connaît les niveaux d'éclairement par les différentes sources (direct et diffus). Sans aucune connaissance sur la FDRB des objets au sol, ce qui est souvent le cas en pratique, nous pouvons tout au plus restituer une réflectance en supposant que les objets au sol sont isotropes. Moyennant un nombre d'hypothèses simplificatrices et compte tenu du niveau généralement faible des sources secondaires d'éclairement, nous pouvons approcher plus ou moins exactement l'estimation de la réflectance bidirectionnelle.

Cette description succincte du problème de la restitution des réflectances montre clairement la complexité de la tâche et la nécessité de chercher des compromis qui facilitent les calculs, tout en permettant de répondre aux besoins des différents types d'applications. Pour illustrer le défi d'une telle restitution et en même temps la nécessité d'une telle opération, nous présentons la figure I-1 qui montre à quel point quatre images ETM+ du même territoire (Montérégie, Québec) prises à des dates différentes peuvent être distinctes. Cette figure illustre également un autre problème dont il n'a pas été fait mention précédemment : celui des nuages. Pour les nuages opaques et leurs ombres projetées au sol, des techniques de localisation automatique et de masquage existent ce qui facilite les opérations subséquentes (Irish, 2000). Ceci n'est pas le cas pour les nuages translucides du type cirrus. Leur

localisation par voie automatique est difficile, et il en est de même pour leur prise en compte lors de la restitution des réflectances. Des techniques sont proposées pour leur détection sur des images possédant des bandes spectrales dans le moyen infrarouge (Gao *et al.* 2002).



Landsat-7 ETM+ du 5-06-2000



Landsat-7 ETM+ du 14-08-2002



Landsat-7 ETM+ du 20-05-2000



Landsat-7 ETM+ du 26-07-2001

Figure I-1. Exemples de conditions atmosphériques sur des images Landsat-7 ETM+. Scène couvrant une partie de la Montérégie, Québec, Canada.

### **I-I-2 Les approches de restitution des réflectances**

Il existe deux approches de base pouvant mener à la restitution des réflectances au sol. La première empirique et la seconde basée sur la modélisation physique du signal.

Les méthodes empiriques nécessitent une série de cibles reconnaissables sur les images de réflectance variable et connue. Il est donc possible, par régression, d'établir la relation entre le signal mesuré par le capteur et la réflectance au sol. Utilisant cette relation, la réflectance de tout pixel sur les images est par la suite estimée (Richardson, 1982; Crippen, 1987; Putsay, 1992; Moran *et al.* 2003). Il est évident que l'hypothèse sous-jacente ici est que les coefficients des équations (2) et (3) sont des constantes pour l'ensemble de l'image. On assume aussi que ce sont des constantes dans le temps ou utilisables pour seulement une date.

L'approche par modélisation physique est de loin la plus utilisée. L'estimation des effets additifs et multiplicatifs de l'atmosphère, de l'effet d'adjacence ainsi que des différents types d'éclairement au sol (équations 2 et 3) se fait en appliquant des solutions approximatives de l'équation du transfert radiatif (ÉTR) dans le système terre-atmosphère. Ces solutions sont intégrées dans des codes atmosphériques qui permettent, en fonction d'une série d'intrants, d'estimer l'ensemble des paramètres recherchés. La plupart de ces codes considèrent l'atmosphère variable seulement dans la direction verticale et supposent une surface terrestre horizontale, la plupart du temps de réflexion isotrope. Les intrants concernent généralement la position du soleil, les propriétés des capteurs et le type et la composition des constituants atmosphériques notamment les aérosols.

Liang (2004 ; tableau 2.10 pages 64 et 65) répertorie l'existence de quatorze codes atmosphériques. Nous ne citerons que ceux qui ont largement été utilisés pour les corrections atmosphériques et la restitution de la réflectance au sol. Historiquement, une des premières adaptations des codes atmosphériques pour le calcul de la réflectance au sol à partir des valeurs numériques des images satellitales est celle du Centre Canadien de Télédétection (Ahern *et al.* 1979). Le code employé était celui de Turner et Spenser (1972) de diffusion simple. Une des innovations importantes pour l'époque a été la mise au point d'une méthode faisant appel aux données de télédétection mêmes afin de calculer la profondeur optique des aérosols (AOD), la méthode des cibles obscures (lacs d'eau oligotrophes). Ce paramètre était par la suite utilisé comme intrant dans le code atmosphérique. Cette méthode est aujourd'hui largement utilisée dans le cas où des mesures d'aérosols par d'autres moyens en concomitance avec le passage du satellite ne sont pas disponibles. Plus tard, Kaufman et Sendra (1988) ont étendu la notion des cibles obscures aux canopées de végétation dense.

Par la suite, deux grandes familles de codes atmosphériques se sont imposées comme des standards pour plusieurs auteurs de travaux de corrections atmosphériques. (A) La famille du code 5S développé par Tanré au laboratoire d'optique atmosphérique de l'U.S.T. de Lille (Tanré *et al.* 1979). Le code 5S considère une diffusion simple et intègre des fonctions de réflectance bidirectionnelles et une fonction d'effet d'adjacence qui dépend de l'AOD. D'autres versions du code 5S sont apparues par la suite : i) un code 5S plus complet présenté par Tanré *et al.* (1992), il prend en compte les diffusions multiples et découple les phénomènes d'absorption et de diffusion; ii) le M5S (modified 5S) réalisé par Teillet et Santer (1991) qui permet d'ajuster les paramètres atmosphériques en fonction de l'élévation du

terrain et de l'altitude du capteur, il comporte aussi le mode inverse de calcul de la réflectance au sol; et iii) le CAM5S (Canadian advanced modified 5S) présenté par O'Neill *et al.*, 1996 qui intègre des gaz atmosphériques supplémentaires (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et NO<sub>2</sub>) et fonctionne avec une résolution spectrale plus fine (2.5 nm). Une évolution plus substantielle a ensuite donné le code 6S, développée par Vermote et ses collaborateurs (Vermote *et al.* 1997-a). Ce code calcule les diffusions multiples à l'aide de la méthode des ordres successifs de diffusion (Successive Orders of Scattering) qui est une technique de résolution numérique de l'ÉTR. Le code 6S améliore aussi la modélisation de la diffusion de Rayleigh, de la FDRB et de l'effet d'adjacence (Vermote et Roger, 1996). (B) La famille du code LOWTRAN et ses versions évoluées MODTRAN et HITRAN utilisant l'approche des ordonnées discrètes (Discrete ordinates) comme solution numérique de l'ÉTR (Kneizys *et al.* 1988; Anderson *et al.* 2001).

Le code 5S (ou ses versions M5S et CAM5S) a servi à plusieurs travaux de corrections atmosphériques. À titre d'exemple, 1) certains auteurs (Deschamps *et al.* 1981; Royer *et al.* 1988-b; Moran *et al.* 1990; Santer *et al.* 1992) ont utilisé les routines du code et des mesures météorologiques *in situ* pour corriger des images SPOT 1 HRV; 2) Haan *et al.* (1991) ont utilisé le modèle SMART, un code 5S simplifié, et ont montré, entre autres, que la précision de la correction est tributaire d'une bonne prise en compte de l'effet de l'environnement et la connaissance précise de la fonction de phase (donc du type) des aérosols; 3) d'autres ont employé les tables de correspondance (Look-Up Tables, LUTs) afin de réduire le temps de calcul qui découle de l'utilisation des routines d'un code atmosphérique. Ainsi, Teillet (1992) a utilisé les LUTs du code 5S et des intrants climatologiques pour corriger des images AVHRR et a montré la sensibilité des indices de végétation aux erreurs d'estimation du contenu en vapeur d'eau et en ozone, à l'AOD et à l'altitude du lieu; 4) Teillet et Fedosejevs (1995) ont présenté une méthodologie de corrections atmosphériques basée sur la formulation du code 5S adaptée aux images Landsat et ont employé la méthode des cibles obscures pour estimer l'AOD à 550 nm par un processus itératif. Les auteurs proposent comme perspectives le remplacement du code 5S par le code 6S, l'utilisation de bases de données de cibles obscures, la subdivision de l'image pour la recherche des cibles obscures, l'identification d'autres types de cibles obscures; 5) Zagolsky et Gastellu-Etchegory (1995) ainsi que Liu *et al.* (1996) ont également utilisé les cibles obscures pour estimer l'AOD par un processus itératif. Les auteurs ont adopté le code 5S pour générer des LUTs qu'ils ont employés par la suite pour les corrections. Cette approche offre un gain de temps considérable.

Dès son apparition, le code 6S (programme ou LUTs) a été privilégié par plusieurs auteurs et a servi avec succès pour plusieurs travaux de corrections atmosphériques en utilisant comme intrants des données climatiques sur l’ozone, la vapeur d’eau et les aérosols (Vermote *et al.* 1997-b; Hu *et al.* 1999; Su, 2000; Zhao *et al.* 2000). Les auteurs justifient leur choix du code 6S par le fait qu’il est facile à adapter aux différents capteurs et qu’il reste valable dans l’ensemble du spectre optique. Ainsi, le code 6S, combiné à la méthode des cibles obscures (eau claire ou végétation dense) a souvent été employé pour les corrections atmosphériques (Ouaidrari et Vermote, 1999; Liu et Vermote, 2000), l’étude de l’influence de l’atmosphère sur l’observation de la végétation (Miura *et al.* 2001; Vermote *et al.* 2002) ou pour l’étude des masses d’eau côtières en terme de contenu en algues ou en matière organique, nature du fond et profondeur (Lavoie *et al.* 2001).

La famille des codes atmosphériques LOWTRAN et MODTRAN est davantage utilisée pour l’estimation des transmittances gazeuses (Thome *et al.* 1998; Liang *et al.* 2003; Berk *et al.* 1999). Kaufman et Sendra (1988) utilisent LOWTRAN-6 pour corriger les images SPOT et AVHRR et emploient des cibles obscures de type végétation dense pour estimer l’AOD par un processus itératif, mais ne considèrent que les diffusions simples. Les LUTs de MODTRAN ont été utilisées par Richter (1996-b) avec la technique d’appariement des histogrammes pour estimer l’AOD, et par Adler-Golden *et al.* (1999) ainsi que Matthew *et al.* (2002) qui dérivent l’AOD des mesures de visibilité. Le logiciel de corrections radiométriques ATCOR (Richter, 2004) est également basé sur le code MODTRAN-4.

Tel que mentionné précédemment, la plupart de ces codes atmosphériques supposent une surface horizontale comme limite inférieure de l’atmosphère. Pour tenir compte des effets topographiques, l’équation (3) permettant d’estimer le signal au sol est le plus souvent modifiée pour introduire les variations de l’éclairement au sol selon la topographie du terrain. L’hypothèse de base est l’invariance de la réflectance en fonction des conditions d’illumination et de visée, ainsi, seul l’éclairement reçu par la surface varie en fonction de la topographie. Cette dernière est connue par pixel de l’image traitée grâce à un modèle numérique d’altitude (MNA). Certains auteurs introduisent des modèles géométriques de réflectance bidirectionnelle (ex. modèle de Minnaert, 1941) pour mieux tenir compte de la variabilité des signaux observée en terrain accidenté, non explicable uniquement par la variation de l’éclairement au sol. Ces modèles ont été testés particulièrement sur des

territoires forestiers. Ils ne sont cependant pas généralisables pour toutes les conditions de la topographie.

## **I-2 La nécessité d’opérer à partir des images de réflectance**

En règle générale, dans les articles discutant de la nécessité d’utiliser des images de réflectance au sol au lieu des images exprimées en valeurs numériques (Turner *et al.* 1979; Maas, 1988; Royer *et al.* 1988-a; Kalluri *et al.* 2003; Teillet *et al.* 2004), il est rarement question de l’évaluation quantitative des erreurs induites par les différents facteurs parasites cités ci-haut dans les diverses applications des images avec leurs problématiques spécifiques.

Pour revoir les travaux liés à la question, nous distinguerons quatre types d’applications des images satellitales : a) analyses d’une seule image en vue de cartographier le territoire; b) analyses d’une seule image en vue d’extraire des informations sur les paramètres biophysiques; c) analyses de plusieurs images acquises à des dates différentes en vue soit de cartographier un vaste territoire (mosaïque) ou pour détecter les changements des occupations du sol (analyses diachroniques) et d) analyses visant le monitoring des ressources (régénération forestière, croissance des cultures, prévision des récoltes, qualité de l’eau, etc.).

### **a- Cartographie unidate**

Dans la littérature nous trouvons un grand nombre d’études portant sur des algorithmes d’extraction des objets à partir des images en vue de la cartographie du territoire où l’on utilise directement les VN sans aucune correction préalable des effets cités ci-dessus. Or, comme le montre l’équation (2), l’atmosphère réduit le contraste entre les objets. D’une part les objets de faible réflectivité apparaissent plus brillants (dominance des effets additifs) et d’autre part les objets de forte réflectivité apparaissent plus sombres (dominance des effets multiplicatifs). De plus ces changements du contraste ne sont pas similaires d’une bande spectrale à l’autre. Les répercussions de cette baisse variable de contraste sur la performance des algorithmes ne sont pas souvent abordées. Nous pouvons citer les études suivantes :

1) Turner *et al.* (1974) et Turner (1975) ont étudié les effets de la stabilité des capteurs, de l’atmosphère et des conditions d’illumination sur les images multispectrales issues du satellite

Landsat-1 lancé en 1972. Ils se basent sur un modèle de transfert radiatif de diffusion simple (simple scattering RTE) développé à l'ERIM (Environmental Research Institute of Michigan) afin d'une part a) d'évaluer la modification des signatures spectrales de classes d'objets par l'effet de l'atmosphère, l'angle solaire et l'angle de visée, et par l'environnement du pixel lorsqu'il est très différent du pixel observé et b) de proposer une méthode de restitution des réflectances au sol. Ils démontrent ainsi qu'un trouble atmosphérique élevé modifie considérablement les signatures spectrales des objets. La comparaison des résultats de la classification d'images multispectrales avec et sans compensation radiométrique montre que les erreurs de classification peuvent être très importantes si l'on utilise les valeurs numériques brutes. Des résultats similaires ont été rapportés par Ahern *et al.* (1977-a) et plus tard par Kaufman et Tanré (1996).

2) Kaufman et Fraser (1984) insistent sur les répercussions des effets atmosphériques sur la qualité de la cartographie des petits objets, un problème important en milieu urbanisé ou en territoire agricole morcelé. Ils utilisent un modèle de transfert radiatif (code de Dave) pour réaliser des simulations de conditions atmosphériques différentes et présentent une analyse de l'effet de l'AOD, de l'environnement et de la taille des objets sur la précision de la classification. Ils recommandent non seulement de corriger les effets optiques de l'atmosphère, mais aussi de considérer la taille des objets (effet d'adjacence).

3) La variation des conditions d'éclairement et de visée, de la sensibilité des capteurs dans les différentes bandes, de la FDRB et des conditions atmosphériques modifient les signatures spectrales des objets, influent sur leur discriminabilité et limitent l'identification de leurs caractéristiques (Duggin, 1985; Wharton, 1987; Zhang et Guindon, 2003). Les corrections radiométriques permettent de faire des comparaisons quantitatives de signatures spectrales d'objets au sol et de réaliser des classifications d'images issues de plusieurs types de capteurs (Hill et Aifadopoulou, 1990; Muller, 1993).

4) Une certaine nuance sur la nécessité de restituer les réflectances en vue de la classification automatique est cependant apportée par certains auteurs. Ainsi Pons et Solé-Sugrañes (1994) notent que dans le cas d'une atmosphère homogène sur l'ensemble de l'image, la compensation des effets adverses de l'atmosphère n'est nécessaire que si le territoire examiné présente des variations importantes de l'altitude. Si une image unique et homogène est

utilisée, les résultats d'une classification dirigée ne sont pas tellement affectés par les conditions radiométriques (Pons et Solé-Sugrañes, 1994; Song *et al.* 2001).

5) L'utilisation des images satellitales optiques en milieu accidenté nécessite l'application de corrections atmosphériques et topographiques. Certains des travaux recensés, notamment en foresterie, n'appliquent que des corrections atmosphériques. Des méthodes simples, telle que la soustraction de cibles obscures sont parfois employées pour réduire l'hétérogénéité due aux conditions atmosphériques différentes (Fassnacht *et al.* 1997; Davi *et al.* 2006 et Soudani *et al.* 2006, pour l'estimation du LAI; Ekstrand, 1994, pour les dommages d'insectes et Woodcock *et al.* 2001, pour la détection des changements). D'autres auteurs ont utilisé des modèles plus complexes notamment ceux basés sur l'inversion de l'ÉTR (Teillet *et al.* 1982, proposent la C-correction pour des images Landsat MSS de forêt en région montagneuse; Xiao *et al.* 2002, appliquent le modèle de Rahman et Dedieu, 1994; Chen et Cihlar, 1996, utilisent le code 5S; Kuusk, 1998, ainsi que McDonald *et al.* 1998, adaptent le code 6S à une canopée de forêt; Maselli, 2004, emploi le modèle de Gilabert, 1994; Pu *et al.* 2005, utilisent le modèle MODTRAN pour corriger des images EO-1 Hyperion et ALI et Landsat-7 ETM+ et estimer le LAI des forêts; Rahman *et al.* 2005, adopte le modèle COST de Chavez, 1996).

## **b- Extraction des paramètres biophysiques**

Un grand nombre de publications est consacré à l'extraction des paramètres biophysiques du couvert végétal. L'application des images satellitales dans ce domaine se fait le plus souvent à l'aide d'indices de végétation qui combinent l'information contenue dans plusieurs bandes spectrales. Le nombre d'indices de végétation développés au cours des deux dernières décennies dépasse la dizaine (Haboudane *et al.* 2004). Ils sont autant affectés par les propriétés biophysiques de la végétation que par des facteurs externes tels que la sensibilité spectrale des capteurs, les conditions d'éclairement et de visée et les effets atmosphériques (Teillet et Ren, 2008). L'influence de la sensibilité spectrale des capteurs est due au fait que la majorité de ces indices font appel à la bande PIR qui englobe les raies d'absorption de la vapeur d'eau. Teillet *et al.* 2007 montrent que l'erreur induite par la différence des sensibilités spectrales des capteurs (TM, ETM+, HRG, QuickBird, Ikonos, ALI et ASTER) peut dépasser 5% dans le PIR alors qu'elle ne dépasse pas 2% dans les bandes du visible. Et malgré les efforts de plusieurs chercheurs pour trouver des indices qui soient les mieux corrélés aux

variables biophysiques recherchées (Myneni et Asrar, 1994; Karnieli *et al.* 2001; Haboudane *et al.* 2004), aucun indice n'est complètement insensible aux « bruits » cités ci-haut.

À travers des simulations basées sur les modèles de transfert radiatif, Myneni et Asrar (1994) ainsi que Teillet *et al.* (1996), démontrent la sensibilité des indices de végétation (NDVI, SAVI, MSAVI, RVI, ARVI et DVI) aux effets atmosphériques et aux propriétés spectrales des capteurs. Guyot et Gu (1994) ont utilisé le code 5S (Deschamps *et al.* 1981) pour montrer que, sans corrections radiométriques, une erreur importante est commise sur le calcul des indices de végétation. Plusieurs raisons sont invoquées par les auteurs : les propriétés des capteurs souvent variables dans le temps, l'effet de l'environnement pour les champs de petite taille ou non homogènes et la diminution de contraste par l'atmosphère. Shin (2000) identifie l'épaisseur optique des aérosols (AOD) comme étant le paramètre qui influe le plus sur le NDVI car il agit différemment dans le PIR (diminution de la réflectance apparente) que dans le rouge (augmentation de la réflectance apparente). De plus, lorsque des méthodes de correction basées sur l'ÉTR sont utilisées, les intrants tels que le contenu en vapeur d'eau, l'AOD, les angles solaires et de visée, doivent être précis pour permettre d'extraire des indices de végétation fiables (Tanré *et al.* 1992; Miura *et al.* 2001).

Malgré l'existence d'indices de végétation moins sensibles à l'effet du sol (SAVI) ou à l'effet additif de l'atmosphère (ARVI, SARVI, AFRI), leurs auteurs préconisent quand même de calculer la réflectance au sol ou du moins de corriger les effets des gaz atmosphériques (Kaufman et Tanré, 1996; Karnieli *et al.* 2001; Miura *et al.* 2001)

La nécessité d'utiliser des indices de végétation précis pour l'étude du couvert végétal paraît plus évidente lorsqu'on effectue des analyses quantitatives. Myneni et Asrar (1994) trouvent que les indices de végétation apparents (sans correction des effets atmosphériques) sont très sous-estimés par rapport à leurs valeurs estimées par des mesures au sol (de 20 à 50%, selon l'indice), ce qui donnerait des erreurs inacceptables si ces indices étaient utilisés pour l'estimation des paramètres biophysiques de la végétation. Walthall *et al.* (2004) utilisent l'indice foliaire (LAI) estimé à partir des images ETM+ pour l'intégrer à un modèle agronomique dans un contexte d'agriculture de précision. Les auteurs mentionnent que le LAI peut être dérivé des indices de végétation à condition de calculer les réflectances à la surface par inversion de modèles de transfert radiatif. L'auteur emploie à cette fin le code 6S tout en portant un intérêt particulier à l'AOD qu'il recueille du réseau mondial AERONET. Guissard

*et al.* (2005) notent pour leur part la difficulté de retrouver le LAI de manière précise et robuste à partir des données de télédétection et ce pour plusieurs raisons notamment celles liées à l'état de la végétation (type de végétation, stade phénologique, conditions agroclimatiques) et celles dues aux conditions d'observation (propriétés du capteur, géométrie d'éclairage et d'observation, conditions atmosphériques, topographie). Les auteurs montrent qu'il est tout de même possible d'utiliser ces données pour la gestion des cultures si la résolution spatiale, la répétitivité temporelle et la précision de la réflectance de la canopée sont satisfaisantes.

En plus de toutes ces études qui se sont intéressées à la sensibilité des indices de végétation aux facteurs radiométriques parasites, la plupart des travaux récents concernant l'utilisation des images multispectrales ou hyperspectrales pour l'observation du couvert végétal (estimation du rendement, détection de stress, suivi phénologique, fertilisation à taux varié, écologie, foresterie,...) appliquent systématiquement des corrections radiométriques et mentionnent la nécessité d'effectuer ces corrections (Myneni *et al.* 1995; Carlson et Ripley, 1997; Jones et Barnes, 2000; Gong *et al.* 2003; Liang *et al.* 2003; Lobell *et al.* 2003; Lobell et Asner 2003; Viña *et al.* 2004; Williams et Hunt 2004; Lee *et al.* 2004; Pu et Gong 2004).

### **c- Mosaïquage et détection des changements**

Les corrections radiométriques s'imposent également lorsque plusieurs images doivent être utilisées. Hill et Sturm (1991), considèrent que les applications multi-temporelles de la télédétection nécessitent des corrections radiométriques ou, comme solution alternative, la normalisation radiométrique aux conditions standard qui dépend, toutefois, de la disponibilité sur l'image de cibles de référence. Les auteurs montrent que même une correction atmosphérique simple améliore la classification et le suivi de la végétation. Zhang *et al.* (2003) utilisent des séries chronologiques de données satellitaires pour le suivi de la phénologie et de la dynamique intra-annuelle et inter-annuelle de la végétation et citent la nécessité d'effectuer des corrections atmosphériques tout en évoquant le problème de manque d'outils permettant de faire des corrections précises. Shin (2000) conclue que le NDVI est significativement sensible aux conditions atmosphériques, ce qui affecte la précision du suivi multi-temporel des surfaces végétales.

Lorsque les images multi-dates sont utilisées à des fins de détection des changements, la nécessité de normalisation radiométrique est rapportée par plusieurs auteurs. Ainsi, Fraser *et al.* (1977) utilisent des images Landsat multi-dates et multi-régions pour montrer que les conditions atmosphériques différentes génèrent des erreurs de classification considérables (~20%). Les auteurs trouvent qu'une modification du trouble atmosphérique de  $\pm 30\%$  modifie la classification de 22% des pixels. Royer *et al.* (1988-a) ont utilisé une série chronologique de 40 images Landsat MSS prises entre 1972 et 1984 afin d'étudier les variations des paramètres de surface de sol à court (échelle saisonnière) et à long terme. Les auteurs montrent, entre autres, la nécessité des corrections atmosphériques et de l'étalonnage et l'intercalibration des capteurs. Ils ont utilisé comme réflecteurs standard de référence des cibles obscures (lacs d'eau claire) et des cibles brillantes (gravières) de réflectances stables et connues. La question de quand et comment appliquer des corrections atmosphériques lors de l'utilisation des images multispectrales pour la classification et la détection des changements a été discutée par Song *et al.* 2001. La nécessité de corriger dépend du type d'information recherchée et de la méthode analytique utilisée pour l'extraire. La méthode de correction dépend quant à elle de la disponibilité des données atmosphériques. Les auteurs ont montré que les corrections atmosphériques sont indispensables dans le cas où des données multi-temporelles seraient utilisées, mais qu'elles le sont moins dans le cas d'une seule image homogène. Pour 7 images Landsat-5 TM prises entre 1988 et 1996 sur Guangdong, Chine, les auteurs ont appliqué 7 algorithmes de correction atmosphérique absolue et un algorithme de correction atmosphérique relative. Les auteurs ont trouvé que toutes les méthodes (huit) de correction améliorent les résultats d'une classification pour la détection des changements.

Pax-Lenney *et al.* (2001) ont utilisé des algorithmes de classifications basés sur les techniques de logique floue et de réseaux de neurones pour étudier l'évolution de forêts de conifères à travers le temps et l'espace dans la région de l'Oregon. Les auteurs ont montré la nécessité d'homogénéiser les images prises à des dates différentes idéalement en calculant les réflectances au sol. Ils ont trouvé qu'une correction atmosphérique basée sur une simple soustraction de la valeur numérique des cibles obscures améliore l'exactitude de la classification de 8 à 13%.

Il existe aussi une approche purement statistique de normalisation radiométrique relative adoptée dans le cas de l'utilisation de plusieurs images (Wilson et Sader, 2002; Nelson *et al.*

2005; Powell *et al.* 2004; Tokola *et al.* 1999; Hall *et al.* 1991). Cette approche ne cherche pas à estimer la réflectance au sol.

La cartographie des changements des occupations de sol se trouvant au cœur des applications de la télédétection, l'élimination des bruits radiométriques (caractéristiques des capteurs, conditions atmosphériques et angles d'éclairement et de visée) des images multi-dates pour les rendre comparables est un facteur clé pour la réussite de la mission de l'observation de la Terre (Alter-Gartenberg *et al.* 2002; Chen *et al.* 2005).

#### **d- Monitoring**

Dans une optique de l'intégration des images satellitales multispectrales aux modèles de croissance des cultures, Moran *et al.* (1997) donnent un inventaire des possibilités et des limitations : les images satellitales sont d'une utilité certaine pour le suivi des cultures à condition de surmonter les limitations d'étalonnage des capteurs, des corrections atmosphériques et la normalisation de la géométrie d'éclairement et d'observation. Tremblay *et al.* (2005) présentent une méthodologie de suivi des cultures de légumes de transformation par modélisation et télédétection. Le LAI est calculé à partir du NDVI issu d'images Landsat-7 ETM+ corrigées à l'aide de la première version du logiciel REFLECT (Bouroubi *et al.* 2006). L'étude a montré que les valeurs de NDVI obtenues du satellite peuvent être comparées à un modèle de croissance et permettre de juger de retards éventuels de croissance susceptibles d'avoir un impact sur le rendement.

### **I-3 Objectifs et méthodologie**

Compte tenu de la problématique exposée précédemment, nous nous sommes fixés les objectifs suivants :

- 1) Développer un logiciel de restitution des réflectances au sol suffisamment modulaire pour pouvoir le bonifier, l'améliorer et l'adapter à diverses problématiques d'applications d'images satellitales.
- 2) Analyser les résultats obtenus par ce logiciel sous diverses problématiques et évaluer l'intérêt d'effectuer cette opération de restitution de la réflectance au sol.

Pour atteindre le premier objectif nous avons utilisé comme base de développement le logiciel « REFLECT » développé dans le laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal. Ce logiciel a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche initié en 2000 en collaboration avec le Centre de Recherche et Développement en Horticulture (CRDH) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada situé à St-Jean-Sur-Richelieu, Québec. Il visait le développement d'un logiciel de corrections atmosphériques des images satellitaires adapté aux conditions particulières du territoire agricole de la Montérégie et applicable aux données ETM+ de Landsat-7. Ce projet a abouti à la première version du logiciel REFLECT (Cavayas, 2003 ; Cavayas *et al.* 2003). Les calculs des paramètres atmosphériques se font sur la base des diverses routines du code atmosphérique 6S tandis que la profondeur optique des aérosols est estimée par la méthode des cibles obscures. Les résultats obtenus avec ce logiciel pour l'observation de cultures dans des champs situés en région montréalaise avec des images Landsat-7 ETM+ étaient encourageants. Les réflectances au sol calculées à l'aide de REFLECT étaient proches des mesures *in situ* réalisées en concomitance avec le passage du satellite. Certaines pistes de recherche pour améliorer les résultats ont toutefois été notées : (a) les différences entre réflectances estimées et réflectances mesurées *in situ* indiquent une loi inadéquate d'extrapolation de la profondeur optique des aérosols à 550 nm à d'autres longueurs d'ondes, (b) il faut améliorer la modélisation de l'effet d'adjacence en introduisant une composante spéculaire dans la réflectance de l'environnement, (c) il faut revoir la méthode de localisation automatique des cibles obscures pour l'adapter à des variations locales de l'atmosphère. Ces pistes ont été suivies dans notre projet de recherche. De plus il était nécessaire : 1) d'adapter les calculs aux images satellitaires à haute résolution autres que celles de Landsat-7 ETM+ (Landsat TM, SPOT HR, Ikonos, QuickBird, EO-1 ALI, ASTER) tenant compte des caractéristiques des capteurs ainsi que des conditions de visée variable; 2) d'introduire une nouvelle formulation pour tenir compte des conditions des terrains accidentés et 3) d'optimiser le temps de calcul, afin de réduire significativement le temps d'exécution de la première version de REFLECT pour une scène satellitaire entière.

Pour atteindre le deuxième objectif, et afin de mieux cerner le problème, nous avons mis l'accent sur les études du couvert végétal dans trois contextes différents : 1) territoire urbain/périurbain avec l'accent mis sur les applications de classification et de suivi des changements, 2) agricole où nous avons étudié les indices de végétation et leurs applications et 3) forestier où nous avons analysé les effets atmosphériques et topographiques sur la cartographie des peuplements et l'évaluation de leur biomasse.

## **I-4 Hypothèses**

Les hypothèses de notre recherche sont les suivantes :

- La solution de l'équation du transfert radiatif adoptée par le code 6S avec toutes les autres hypothèses sous-jacentes de calcul incluses dans ce code ou modifiées par nous (ex. profondeur optique des aérosols et effet d'adjacence) fournissent des réflectances au sol suffisamment précises pour répondre aux exigences des diverses applications.
- La méthode des cibles obscures associée au code 6S permet une estimation de l'épaisseur optique des aérosols comparable à celle obtenue par des mesures *in situ*. De plus cette méthode adaptée localement aux images permet d'obtenir une information de qualité sur la variation horizontale de l'état de l'atmosphère en ce qui concerne l'épaisseur optique des aérosols.
- Les corrections radiométriques permettent d'obtenir la réflectance au sol qui est la vraie propriété recherchée et qui décrit l'information à utiliser alors que les valeurs numériques, entachées de plusieurs informations indésirables (conditions d'observation et de visée, capteur, atmosphère, topographie) ne donnent pas des résultats adéquats.
- L'utilisation des réflectances au sol au lieu des valeurs numériques améliore considérablement la fiabilité de la plupart des applications de la télédétection par imagerie satellitale multispectrale.

## **I-5 Contribution à l'avancement des connaissances**

Même si plusieurs travaux ont été réalisés dans le domaine de la restitution de la réflectance au sol à partir des images satellitales ou sur la question de la nécessité de cette opération pour les diverses applications, il y avait encore la possibilité d'apporter une contribution importante, globalement ou spécifiquement. Ainsi, nous considérons que cette recherche permet d'approfondir et d'enrichir les différents aspects traités dans notre travail par :

- L'actualisation du modèle d'aérosol du code 6S et adaptation de l'estimation des effets des aérosols en fonction des bandes spectrales au territoire d'étude;

- L'utilisation d'une recherche automatique ou semi-automatique des cibles obscures;
- La proposition d'un nouveau modèle d'effet d'adjacence particulièrement important avec des images à haute résolution dans des territoires morcelés comme les territoires urbains ou les territoires agricoles québécois;
- L'intégration d'une correction topographique adaptable à une canopée forestière;
- La prise en compte de la majorité des capteurs multispectraux utilisés actuellement;
- L'organisation de l'algorithme sous forme de logiciel pratique;
- Un temps de calcul optimum grâce à une génération interne de LUTs;
- L'étude de l'influence des effets des angles d'éclairément et de visée, de l'atmosphère et de la topographie sur un large éventail d'application des images satellitales dans les domaines urbain, agricole et forestier.

## **I-6 Structure de la thèse**

La thèse est divisée en 13 chapitres excluant le chapitre d'introduction. Le chapitre II donne un aperçu des divers aspects méthodologiques de la recherche ainsi que des données et outils utilisés. Les chapitres III et IV présentent les éléments de base du logiciel REFLECT (théorie, formulation, calculs, structure informatique) et constituent la première partie de la thèse intitulée « *Le logiciel REFLECT : aspects théoriques, calculs et structure informatique* ». Les chapitres V à IX décrivent en détail certains développements spécifiques concernant les aérosols, l'effet d'adjacence et les effets topographiques et présentent une série de tests de validation de ces aspects spécifiques et du logiciel REFLECT dans son ensemble. Ces chapitres constituent la deuxième partie de la thèse intitulée « *Le logiciel REFLECT : aspects spécifiques et validations* ». Les chapitres X à XIII présentent différents tests de simulation et des calculs avec des images réelles dans les trois contextes (urbain, agricole et forestier). Ces chapitres constituent la troisième partie de la thèse intitulée « *Influence des corrections atmosphériques et topographiques sur la qualité des informations extraites des images de télédétection* ». Le dernier chapitre de la thèse (XIV) présente une synthèse des résultats, propose de nouvelles perspectives de recherche ouvertes par nos travaux et tire les conclusions principales quant à la validité des hypothèses émises dans cette recherche. Nous avons également inclus une série d'annexes qui présentent en détail certains aspects théoriques et pratiques du logiciel REFLECT.

## **CHAPITRE II - Approche méthodologique**

Les travaux réalisés dans cette thèse concernent essentiellement deux volets : (1) un volet « développements » qui consistait à réaliser un outil de correction radiométrique des images satellitaires optiques multispectrales (nouvelle version de l'algorithme REFLECT), ce volet a occupé la majeure partie du temps consacré à la thèse et (2) un volet « applications » où nous avons utilisé le logiciel réalisé pour l'étude des effets de l'atmosphère et la topographie sur les applications de la télédétection dans les domaines urbain et périurbain, agricole et forestier. Les étapes de déroulement des travaux sont résumées dans l'organigramme de la figure II-1.

### **II-1 Les étapes de développement**

Au départ, une recherche bibliographique, dont les principaux résultats sont présentés au chapitre I, nous a permis de comprendre la problématique des distorsions radiométriques dans les images satellitaires et de comparer les différentes méthodes et techniques de restitution de la réflectance au sol. L'état de l'art nous a guidé vers le choix de l'approche physique basée sur l'ÉTR et vers l'utilisation du code 6S comme modèle de résolution de cette équation. Cette approche nécessite quelques intrants notamment l'AOD que nous avons choisi d'estimer par la méthode des cibles obscures. Nous avons ainsi utilisé les routines du code 6S que nous avons traduit en langage C++ et avons monté, autour de ces routines, l'algorithme de corrections radiométriques en s'inspirant de la première version de REFLECT réalisée par le directeur de cette thèse, le professeur François Cavayas. Nous avons également rajouté une option de traitement rapide à l'aide d'un pré-calcul de paramètres atmosphériques typiques puis la généralisation à l'ensemble de l'image. Par la suite, et en partant des recommandations de l'auteur de la première version de REFLECT (Cavayas, 2003), nous avons entamé l'étape d'actualisation et d'améliorations de certains modèles notamment ceux liés au modèle d'aérosols du code 6S et à la correction de l'effet d'adjacence. Une recherche bibliographique complémentaire nous a permis d'opter pour l'intégration d'un modèle d'aérosols plus récent qui tient compte de l'effet de l'humidité relative de l'air sur les propriétés de certains types d'aérosols (water soluble) et de proposer un modèle d'adjacence qui tient compte de la réflexion spéculaire des objets brillants. L'intégration des capteurs multispectraux HR et VHR les plus utilisés actuellement (Landat TM et ETM+, SPOT 1 à 5 HR, EO-1 ALI, Ikonos, QuickBird et ASTER) a nécessité de recueillir toutes les informations techniques relatives à

chaque capteur et les adapter au code 6S. En parallèle, nous avons réalisé une interface graphique conviviale. L'étape suivante consistait à intégrer un modèle de correction topographique adapté à la formulation du code 6S, que nous avons ajusté et validé à la canopée forestière. Enfin, les méthodes de correction atmosphérique et topographique ont été validées à partir des données (images et mesures au sol) répertoriées dans la section II-3.

## **II-2 Le choix des applications**

REFLECT a été utilisé pour étudier les effets des conditions atmosphériques et topographiques, des propriétés des capteurs, des conditions d'éclairement et de visée sur les différentes applications de la télédétection et ce dans le but d'apporter des éléments de réponse à la question de départ, à savoir : quand et comment faut-il corriger ?

Les applications portent sur trois domaines distincts et leurs problématiques spécifiques.

- Les applications en milieu urbain concernent la classification et la détection des changements. Le territoire d'étude est la région de Montréal. Des images multi-dates et multi capteurs (Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, SPOT 1 HRV et SPOT 5 HRG) sont utilisées.
- Les applications agricoles sont basées sur l'utilisation d'indices de végétation. Ces applications se feront sur des surfaces végétalisées situées en région montréalaise. Les images du capteur Formosat-2 sont utilisées pour illustrer les effets atmosphériques et l'effet d'adjacence.
- Les applications au milieu forestier portent sur les effets topographiques dans l'observation des forêts. Deux types d'applications ont été réalisées : i) l'estimation de la biomasse forestière à partir d'une image Landsat-7 ETM+ couvrant la région montagneuse d'Oka, Laurentides (Québec) et ii) la classification du couvert forestier de la même scène.

En plus des applications avec les images réelles, des simulations des effets radiométriques sur les signatures spectrales, les classifications et les indices de végétation ont été réalisées.

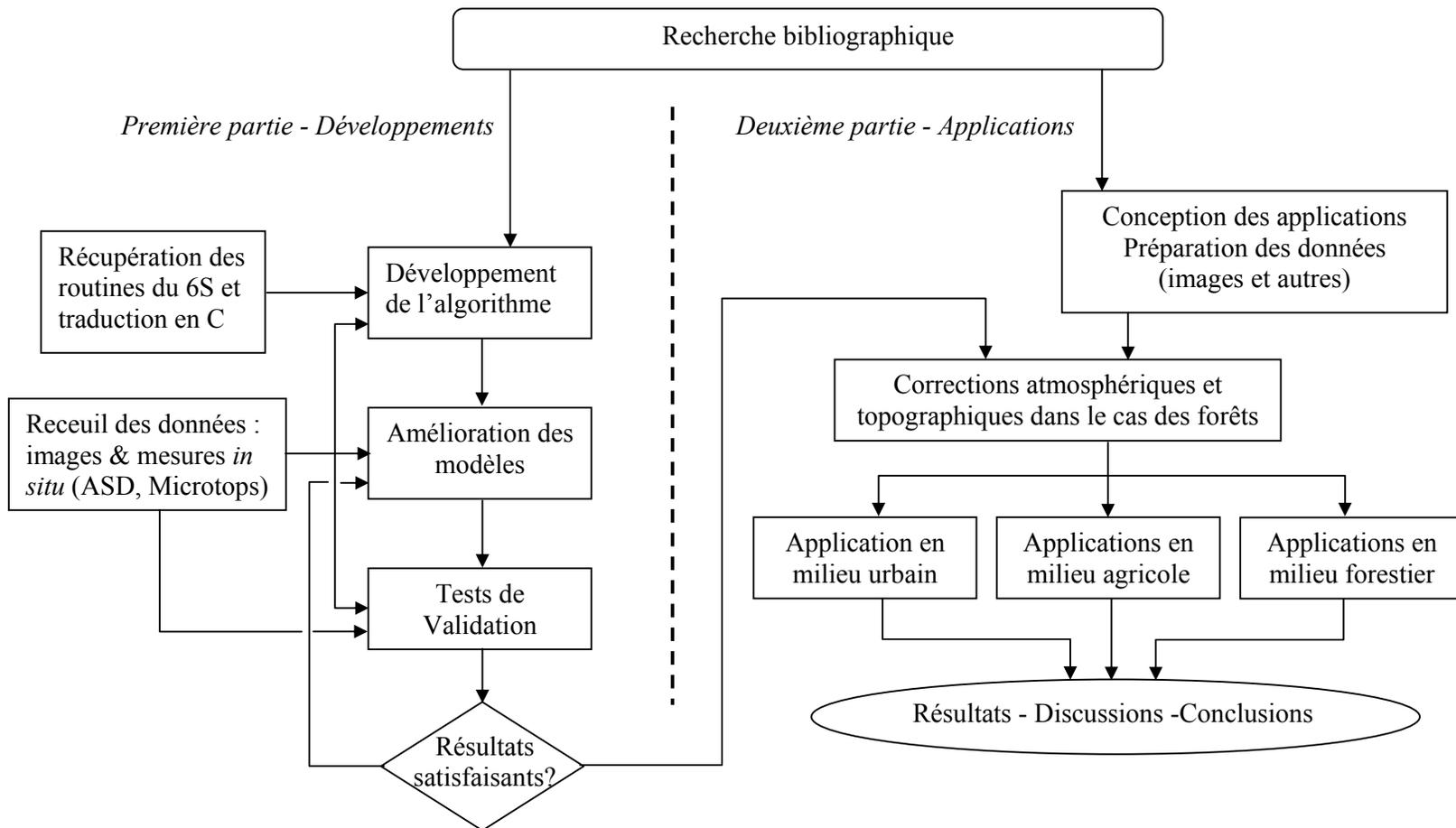


Figure II-1. Étapes des travaux de développement de l'algorithme de correction radiométrique REFLECT et son utilisation pour l'étude de l'influence des effets atmosphériques et topographiques sur les applications de la télédétection.

## II-3 Les données utilisées

Nous avons utilisé des images Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, SPOT 1 HRV, SPOT 5 HRG, EO-1 ALI, Ikonos et Formosat-2 pour la validation de REFLECT ou pour les applications réalisées. Les dates des images et l'objet de leur utilisation sont illustrés au tableau II-1. Pour les scènes qui ont servi à l'étude des effets topographiques (ETM+ autour de Montréal, Québec et HR de Tarn, France), les pentes et les orientations des pixels ont été calculées à l'aide d'un MNA. Ce dernier a été généré à partir des courbes de niveau de la carte avec une résolution de 10 m pour la scène autour de Montréal et de 20 m pour le site de Tarn.

Des mesures d'AOD ont été réalisées pendant les étés 2005 à 2007, à l'aide d'un radiomètre de type Microtops (Microtops II sunphotometer, SOLAR Light co.). Les sites de mesure se situent à St-Jean-Sur-Richelieu, Québec, au CRDH d'AAC et à St-Valentin, Québec, sur des champs agricoles. Quelques mesures ont également été effectuées en région urbaine de Montréal et dans les Laurentides, Québec, en région montagneuse, près de Mont Tremblant (tableau II-2). Ces mesures sont utilisées pour vérifier la relation d'extrapolation de l'AOD à 550 nm aux autres longueurs d'onde (voir chapitre V). Elles sont également comparées aux données d'AOD récupérées du réseau AERONET (AEROSol RObotic NETwork). Ce réseau est accessible via le site : <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.

À l'aide d'un spectroradiomètre « FieldSpec HH pro » d'ASD, des mesures de réflectance ont été réalisées sur des champs agricoles par l'équipe du chercheur Nicolas Tremblay du CRDH au moment du passage du satellite pour quatre des images Landsat-7 ETM+ dont nous disposons (tableau II-3). Une mesure ASD a également été réalisée sur une cible brillante (toiture d'un bâtiment située à l'entrée de la ville de St-Jean-sur-Richelieu; 45°26'24" N, 72°52'13" O) afin de valider la correction des effets multiplicatifs de l'atmosphère. Ces réflectances sont intégrées par bande spectrale des images employées en tenant compte des sensibilités spectrales du capteur et de l'éclairement solaire.

Les données météorologiques de température et d'humidité relative correspondant aux dates d'acquisition des images ont été récupérées du site d'Environnement Canada ([http://www.meteo.gc.ca/canada\\_f.html](http://www.meteo.gc.ca/canada_f.html)) dans le but d'estimer le contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère tel qu'expliqué dans la section III-2.

Tableau II-1. Liste des images satellitales utilisées pour la validation de REFLECT et pour l'étude de l'influence des effets radiométriques sur les applications dans les milieux urbain, agricole et forestier (Abréviations : C.O. : recherche des cibles obscures, Cor. atm. : corrections atmosphériques, Cor. topo. : corrections topographiques, Dét. Ch. : détection des changements, Classif. : classification, VIs : indices de végétation, adjac. : effet d'adjacence, Biom. : estimation de biomasse).

Image	Date	Utilisation								
		Validations				Applications				
		AOD	C.O.	Cor. atm.	Cor. topo.	Milieu urbain		VIs et adjac.,	Milieu forestier	
Dét. ch.	Classif.					Biom.	Classif.			
Landsat-5 TM couvrant Montréal, la Montérégie et les Laurentides, Québec, Canada (45°36'40"N ±16' ; 73°30'40"O ±28')	17-06-1984									
	25-07-1992									
	18-06-1996									
	27-08-1998									
	27-06-2005									
Landsat-7 ETM+ couvrant Montréal, la Montérégie et les Laurentides, Québec, Canada (45°36'40"N ±16' ; 73°30'40"O ±28')	20-05-2000									
	05-06-2000									
	08-06-2001									
	26-07-2001									
	11-08-2001									
	14-08-2002									
EO-1 ALI, Montérégie, Québec, Canada	14-08-2002									
SPOT 1 et 5 HR, Montréal, Québec, Canada (45°32'50"N ±11'; 73°40'30"O ±12')	01-08-1987									
	29-07-2006									
SPOT 1, Tarn, France (43° 39' 00" N, 02° 41' 52" E)	05-09-1988									
	24-09-1989									
	03-09-1990									
Ikonos Paulatuk, Territoires N-O*	29-08-2002									
Formosat-2, Montréal, Québec, Canada	9 images**									

\*Paulatuk, Territoires du Nord-Ouest, Canada (69°20'30" N ; 124°04'00" O).

\*\* Dates des 9 images Formosat-2 utilisées : 05, 19, 21, 22, 25, 27, 28 juin et 02 et 03 juillet 2005.

Tableau II-2. Liste des mesures de l'épaisseur optique des aérosols réalisées par le radiomètre Microtops.

Lieu	Coordonnées	Dates et heures locales des mesures
CRDH, St-Jean-Sur-Richelieu Québec	(45°17'43" N ; 73°20'47" O)	22-06-2005 14h30 ; 27-06-2005 14h00 ; 11-07-2005 8h30 ; 15-06-2007 12h ; 18-06-2007 14h30 ; 28-08-2007 13 ; 04-09-2007 15h ; 25-09-2007 13h30 ; 22-10-2007 13h30
Champs agricoles, St-Valentin, Montérégie, Québec	(45°5'21" N ; 73°21'3" O)	11-07-2005 10h30 ; 11-07-2005 11h30 ; 20-07-2006 11h ; 29-06-2007 9h45 ; 10-07-2007 10h ; 01-08-2007 15h
Mont tremblant, Laurentides, Québec	(46°11'10" N ; 74°37'00" O)	05-082007 16h40 ; 05082007 17h45
Montréal (centre ville), Québec	(45°31' N ; 73°25' O)	02-09-2007 14h

Tableau II-3. Liste des mesures *in situ* de réflectance (avec un spectroradiomètre ASD) correspondant aux images Landsat-7 ETM+ utilisées pour les applications en agriculture.

Date	Lieu	Culture	Coordonnées UTM et nombre de points
05-06-2000	St-Hilaire, Québec	Pois	3 points autour de (650491 ; 5041947) 3 points autour de (647461 ; 5040932)
26-07-2001	L'Acadie, Québec	Haricot maïs sucré	5 points autour de (630071 ; 5017165) 4 points autour de (630191 ; 5017164)
11-08-2001	L'Acadie, Québec	Maïs sucré	4 points autour de (630160 ; 5017164)
14-08-2002	Rougemont, Québec	Maïs sucré	3 points autour de (651290 ; 5029557) 3 points autour de (656197 ; 5031741) 6 points autour de (656667 ; 5026579)

## II-4 Simulation de réflectance au sol de matériaux de référence dans les bandes spectrales des capteurs d'intérêt

Comme nous ne disposons pas d'un grand nombre de mesures ASD, nous avons réalisé une application (« SigSpec\_Librairie ») qui utilise les réflectances des matériaux fournies dans la librairie ASTER de USGS pour simuler les réflectances de matériaux pour chacune des bandes spectrales des capteurs d'intérêt. Cette application nous permettra de valider le calcul des réflectances au sol pour les différents capteurs sur des matériaux identifiés sur les images. Les surfaces suivantes sont considérées : eau calme (lacs), eau turbide (fleuve), asphalte (autoroutes) et végétation (conifères, feuillus et gazon). Dans l'application « SigSpec\_Librairie » (figure II-2), les matériaux de la librairie ASTER ont été regroupés

dans les classes suivantes : les matériaux artificiels (comme l'asphalte), la végétation, les sols, les roches, et les eaux et glaces. Nous avons intégré à l'application les capteurs multispectraux couramment utilisés actuellement, à savoir : TM et ETM+ de Landsat, ALI de EO-1, ASTER de Terra, HR de SPOT, Ikonos et QuickBird.

La réflectance au sol par bande spectrale  $R_{bande,materiau}$  est calculée à l'aide de l'expression :

$$R_{bande,materiau} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{materiau} \cdot SS_{bande} \cdot E_0 \Delta\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} SS_{bande} \cdot E_0 \Delta\lambda} \quad (4)$$

Avec :  $\rho_{materiau}$  est la réflectance spectrale donnée par la librairie ASTER de USGS pour un matériau donné,  $SS_{bande}$  la sensibilité spectrale du capteur par bande,  $E_0$  l'éclairement solaire spectral hors atmosphère et  $\Delta\lambda$  le pas de longueur d'onde.

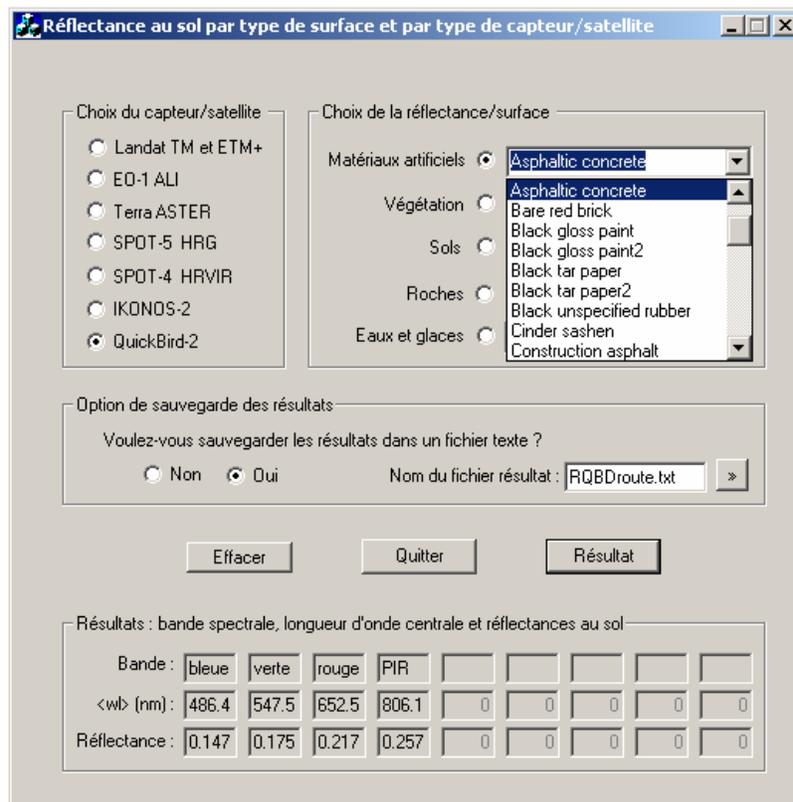


Figure II-2. Application « SigSpec\_Librairie » de calcul des réflectances au sol pour des matériaux répertoriés dans la librairie spectrale ASTER de USGS dans les bandes spectrales des capteurs optiques multispectraux HR et VHR ciblés par l'étude.

## **PREMIÈRE PARTIE**

### **Le logiciel REFLECT : aspects théoriques, calculs et structure informatique**

La première version du logiciel REFLECT a été développée au laboratoire de télédétection, Département de géographie, de l'Université de Montréal dans le cadre de la thèse de doctorat d'André Lavoie « *Potentiel des images satellitaires multibandes à haute résolution spatiale pour la cartographie des composants de l'eau en milieu côtier marin* » parue en 1997. Le logiciel (écrit en langage T. Pascal) était développé dans le but d'estimer les réflectances de l'eau en milieu littoral à partir des images Landsat-7 ETM+ et incorporait des routines du code 6S pour calculer les paramètres atmosphériques ainsi qu'un nouveau modèle de transfert radiatif dans l'eau (Lavoie *et al.* 2001).

La programmation a été reprise par le Professeur François Cavayas, directeur de cette thèse, afin d'adapter le logiciel à des applications terrestres, particulièrement dans le cas d'estimation des réflectances des cultures agricoles à partir d'images multispectrales ETM+ de Landsat-7. En plus de l'intégration des routines du code 6S, le logiciel contenait un module de calcul de la profondeur optique de l'aérosol à partir des cibles obscures, largement inspiré de l'approche utilisée dans le logiciel TASIC du Centre Canadien de Télédétection (Ahern *et al.* 1979). Ce développement s'est fait dans le cadre d'un projet de collaboration avec le Centre de Recherche et de Développement en Horticulture (CRDH), Agriculture et Agroalimentaire Canada, St-Jean-sur-Richelieu, Québec (Cavayas 2003; Cavayas *et al.* 2003). Cette programmation a été reformulée en code C++ afin d'accélérer les calculs. Le logiciel a été testé par l'auteur de cette thèse, toujours en collaboration avec le CRDH, avec une série d'images Landsat-7 ETM+ et diverses mesures *in situ* (Bouroubi *et al.* 2006). La dernière version développée dans le cadre de cette recherche est présentée ici. Dans cette partie de la thèse nous donnons les fondements théoriques de base du logiciel REFLECT ainsi qu'une description de la structure informatique du logiciel. Les modifications majeures apportées dans le cadre de cette recherche sont revues dans la Partie II.

Le code 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) qui est à la base de REFLECT a été développé au Département de géographie de l'Université du Maryland, USA, en collaboration avec le laboratoire d'optique atmosphérique de l'Université de Lille, France (Vermote *et al.* 1997-a). C'est une version améliorée du code 5S (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) développé par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de l'Université de Lille (Tanré *et al.* 1979). Comme son nom l'indique, le code 6S est un outil de simulation du signal. En effet, le 6S permet de simuler la luminance spectrale mesurable par un capteur visant un élément de surface de réflectance connue et

éclairée par le soleil selon un angle quelconque, à travers une atmosphère possédant des caractéristiques définies par l'utilisateur. À l'inverse, 6S peut aussi estimer la réflectance d'un élément au sol à partir d'une luminance spectrale mesurée par un capteur sous des conditions d'éclairement et des conditions atmosphériques définies par l'utilisateur. La version du code utilisée dans cette recherche est parue en 1997. Depuis 2005, une nouvelle version de ce code est disponible, elle inclut les effets de polarisation du rayonnement solaire. Ces effets cependant ne sont pas pris en compte dans notre travail car les capteurs utilisés y sont insensibles. On retrouve également dans cette version une série d'autres modifications par rapport à la version de 1997 dont nous ferons mention dans cette partie de la thèse.

## **CHAPITRE III – Aspects théoriques et calculs**

Le développement d'une procédure de correction des effets atmosphériques et topographiques pour le calcul de la réflectance au sol nécessite une série d'hypothèses simplificatrices et d'approximations permettant de trouver une solution pratique au problème complexe de transfert radiatif dans le système terre-atmosphère. Ces hypothèses concernent :

- 1) La structure et la constitution de l'atmosphère.
- 2) Les propriétés de diffusion et d'absorption des constituants atmosphériques.
- 3) La structure de la surface terrestre et les propriétés de réflexion de ses constituants.

Nous examinerons ces hypothèses ainsi que la formulation qui en découle en fonction du code 6S. Les modifications majeures apportées dans le cadre de cette recherche et leurs implications sur la formulation y sont également décrites.

### **III-1 Les hypothèses de base**

#### **III-1-1 Structure et constitution de l'atmosphère**

Le code 6S suppose une atmosphère exempte de nuages stratifiée en couches parallèles, chacune des couches étant caractérisée par son propre contenu en molécules des gaz ainsi qu'en particules d'aérosol. Cette atmosphère multi-couches constitue une amélioration par rapport à des codes supposant une atmosphère uni-couche, comme c'est le cas de son prédécesseur, le code 5S (dans sa première version). Puisqu'on suppose que les constituants ne varient que dans la direction verticale, il s'agit d'une structure 1-D de l'atmosphère. Cette hypothèse, tout en simplifiant la formulation de l'équation de base du transfert radiatif, est très valable pour les gaz atmosphériques qui ne varient pratiquement pas dans l'espace ( $N_2O$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ). Toutefois, pour les constituants atmosphériques variables dans l'espace, tels la vapeur d'eau et les aérosols, cette hypothèse ne se vérifie pas toujours. Une façon de traiter cette variabilité sera proposée plus loin (Partie II).

Par ailleurs, la structure multi-couches de l'atmosphère du code 6S, qui divise la colonne atmosphérique en 34 niveaux entre le sol et le sommet de l'atmosphère, permet de prendre en compte l'altitude de la cible et la hauteur du capteur. Ainsi, pour une cible se trouvant à une certaine altitude du niveau de la mer, le code 6S prend en compte la diminution du nombre de particules diffusives (molécules et aérosols) et les gaz absorbants qui se trouvent au dessus de la cible en altitude. Les profils atmosphériques de pression et de température sont utilisés pour ajuster les épaisseurs optiques des constituants de l'atmosphère affectés par l'altitude, tel que les aérosols et la vapeur d'eau qui se trouvent davantage concentrés dans les couches inférieures. Dans le cas des capteurs aéroportés (qui n'est pas traité dans le cadre de cette thèse), les épaisseurs optiques sont corrigées dans le trajet ascendant de manière à ne considérer que la colonne atmosphérique qui se trouve entre le sol et le capteur (Teillet et Santer, 1991).

### **III-1-2 Propriétés de diffusion et d'absorption**

La prise en compte de l'absorption gazeuse dans le code 6S se fait au moyen des modèles Goody pour H<sub>2</sub>O et Malkmus pour O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> (voir annexe 1). La diffusion par les gaz atmosphériques est modélisée par la théorie de Rayleigh alors que la diffusion par les aérosols est décrite par la théorie de Lorenz-Mie (voir annexe 2). L'hypothèse de la diffusion simple (comme c'est le cas pour le code 5S) est valable uniquement si le trajet optique est très fin ( $\tau \ll 1$ ) et l'albédo de diffusion très faible ( $SC \ll 1$ ). Comme ces conditions ne sont pas toujours vérifiées (Teillet, 1990), le problème de diffusion multiple doit être considéré (Petty, 2006, p. 332). La prise en compte de la diffusion multiple dans les couches atmosphériques du code 6S s'effectue à l'aide de la résolution de l'équation de transfert radiatif par la méthode des ordres successifs de diffusion (voir annexe 3).

Le code suppose aussi l'indépendance des processus d'absorption par les molécules de gaz et de diffusion atmosphérique par les molécules (diffusion de Rayleigh) et les aérosols (diffusion de Mie). Cette hypothèse est valable car les capteurs d'intérêt opèrent à l'intérieur des fenêtres atmosphériques où l'absorption gazeuse est faible. Toutefois, une certaine dépendance peut être introduite, si souhaitée par l'utilisateur, particulièrement pour les premières couches de l'atmosphère (de 2 à 3 km du sol) en faisant interagir la vapeur d'eau et les aérosols (voir section III-1-4).

### III-1-3 Structure de la surface terrestre et propriétés de réflexion

Le code 6S suppose que l'atmosphère est limitée par une surface terrestre horizontale. Trois cas sont alors pris en compte : a) l'objet visé fait partie d'une surface lambertienne qui s'étend à l'infini; b) l'objet visé fait partie d'une surface anisotrope (propriétés bidirectionnelles) qui s'étend à l'infini; et c) l'objet visé occupe la partie centrale d'une surface régulière (un cercle) d'une étendue limitée avec des propriétés lambertiennes et il est entouré d'une surface lambertienne qui s'étend à l'infini avec un niveau de réflectance différent de celui de l'objet visé. Celui des trois cas qui s'approche le plus des conditions habituellement observées en télédétection est le dernier. Sa configuration a été retenue dans notre logiciel, cependant, des modifications majeures ont été introduites. En effet :

- 1) la condition d'une surface horizontale a été enlevée;
- 2) une cible à la surface peut être occupée par un seul pixel de l'image;
- 3) les objets considérés avoisinants de la cible couvrent une surface limitée;
- 4) la réflectance de la cible peut dévier de la lambertianité; et
- 5) la réflectance des objets avoisinants la cible peut aussi dévier de la lambertianité.

Les implications de cette nouvelle condition d'une surface de topographie variable sur la formulation du code 6S sont examinées dans ce chapitre tandis que les questions de la non lambertianité de la réflectance de la cible et de son environnement sont examinées en détail dans la Partie II de la thèse.

### III-2 Formulation

Dans ce qui suit, nous présentons la formulation de base du 6S (avec les modifications pour un terrain incliné) dans le cas d'une inversion des calculs, c'est-à-dire de la luminance mesurée à la réflectance au sol, tel qu'appliqué dans cette recherche.

Le code 6S formule le problème du transfert radiatif en terme de facteurs de réflectance et non pas en terme de luminances. En d'autres mots toutes les luminances générées dans le système terre-atmosphère (Figure III-1), dont la description est donnée dans la section I-1-1, sont exprimées par rapport à la luminance ( $L_{Lamb}^{sat}$ ) d'une cible hypothétique lambertienne de réflectance unité, éclairée et observée sous les mêmes conditions que la cible et placée au sommet de l'atmosphère. Cette luminance vaut :

$$L_{Lamb}^{sat}(\bar{\lambda}) = \frac{1}{\pi} E_0(\bar{\lambda}) d_s^2 \cos \theta_s \quad (5)$$

$E_0$  est l'éclairement solaire hors atmosphère,  $d_s$  le facteur de correction de la variation de la distance terre-soleil et  $\theta_s$  l'angle zénithal du soleil.

Ainsi la luminance mesurée par le capteur à une bande spectrale donnée  $L^{sat}$  est décrite en termes de réflectance apparente  $\rho^{sat}$  par :

$$\rho^{sat}(\bar{\lambda}) = L^{sat}(\bar{\lambda}) / L_{Lamb}^{sat}(\bar{\lambda}) \quad (6)$$

La description détaillée de la formulation du code 6S est donnée dans les manuels d'utilisateur qui accompagnent le code source (<ftp://kratmos.gsfc.nasa.gov/pub/6S/>). Nous reprenons ici les équations de base pour faciliter la compréhension du texte qui suit. Afin d'alléger ce texte, les références à la longueur d'onde et à la géométrie de visée et d'illumination dans les quantités impliquées sont parfois omises.

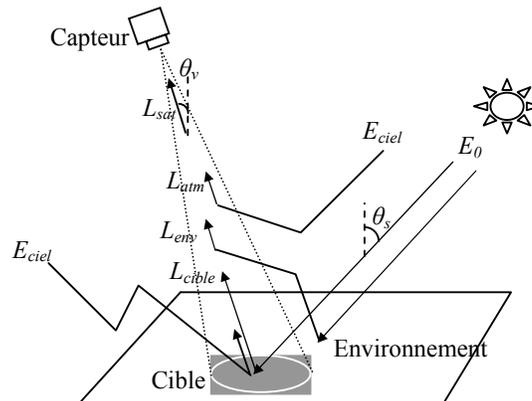


Figure III-1. Composantes du rayonnement solaire reçues par un capteur de télédétection.

### a- Formulation originale du code 6S

**Cas 1 :** Terrain horizontal et cible lambertienne avec découplage des phénomènes de diffusion et d'absorption.

En supposant l'indépendance entre les phénomènes de diffusion et d'absorption atmosphériques, la réflectance apparente est donnée par l'équation suivante :

$$\rho^{sat} = T_{gaz} \left( \rho_{atm} + \frac{T^\downarrow(\theta_s) t_{dir}^\uparrow(\theta_v) \rho_{sol} + T^\downarrow(\theta_s) t_{diff}^\uparrow(\theta_v) \rho_{env}}{1 - S_{alb} \rho_{env}} \right) \quad (7)$$

Avec :

- $\rho^{sat}$  : réflectance de la cible au niveau du satellite,
- $\rho_{sol}$  : réflectance au sol de la cible,
- $\rho_{atm}$  : réflectance intrinsèque de l'atmosphère, due à la diffusion par les molécules (Rayleigh) et les aérosols (Mie), appelée aussi réflectance de parcours,
- $\rho_{env}$  : réflectance de l'environnement de la cible,
- $T_{gaz}$  : transmittance gazeuse totale (trajet descendant et ascendant),
- $T^\downarrow(\theta_s)$  : transmittance de diffusion totale (directe et diffuse) de l'atmosphère dans le trajet descendant du soleil (haut de l'atmosphère) vers la cible au sol,
- $t_{dir}^\uparrow(\theta_v) = \exp(-\tau / \mu_v)$  : transmittance de diffusion du signal direct réfléchi par la cible dans le trajet ascendant de la cible au sol vers le capteur, avec  $\mu_v = \cos(\theta_v)$ , où  $\theta_v$  est l'angle de visée du satellite et  $\tau$  l'épaisseur optique totale de l'atmosphère qui vaut la somme des épaisseurs optiques des aérosols et des molécules  $\tau = (\tau_A + \tau_R)$ ,
- $t_{diff}^\uparrow(\theta_v)$  : transmittance de diffusion du signal diffus réfléchi par la cible et l'environnement dans la direction du capteur, elle est due aux molécules et aux aérosols et s'écrit aussi :  $t_{diff}^\uparrow(\theta_v) = t_{diff}^R(\theta_v) + t_{diff}^A(\theta_v)$
- $S_{alb}$  : albédo sphérique de l'atmosphère.

Les divers termes de l'équation 7 représentent les phénomènes suivants (décrits dans la section I-1-1) :

- 1) Le terme ( $\rho_{atm}$ ) est la luminance parasite ou luminance de parcours normalisée ( $L_{atm}$  dans la figure II-1) introduite par diffusion du rayonnement solaire incident dans le champ de vue du capteur (effet ou bruit atmosphérique additif).
- 2) Le terme  $T^\downarrow(\theta_s) t_{diff}^\uparrow(\theta_v) \rho_{env}$  décrit la luminance normalisée due au rayonnement solaire réfléchi par la surface environnante de la cible observée ( $L_{env}$  dans figure III-1) et qui après diffusion atmosphérique s'introduit dans le champ de vue du capteur (effet d'adjacence). Cette luminance est considérée aussi comme du bruit (additif) car elle ne contient pas d'information sur la surface visée par le capteur. L'importance de ce bruit est élevée pour les cibles à faible réflectance.

3) Le terme  $T^\downarrow(\theta_s)t_{dir}^\uparrow(\theta_v)\rho_{sol}$  décrit le signal utile (correspondant à  $L_{cible}$  dans la figure III-1) qu'il faut estimer par les mesures du satellite en éliminant les effets multiplicatifs de l'atmosphère (transmittance totale dans le trajet descendant et transmittance direct dans le trajet ascendant) car c'est la réflectance du sol  $\rho_{sol}$  qu'on recherche.

4) Le terme au dénominateur est rajouté afin de tenir compte de l'augmentation du signal utile par des réflexions multiples entre le sol et l'atmosphère caractérisée par son albédo sphérique  $S_{alb}$ ; augmentation qu'il faut prendre en considération pour une estimation plus précise de  $\rho_{sol}$ , notamment dans le cas d'une atmosphère très brumeuse et d'un environnement hautement réfléchissant.

**Cas 2 :** Terrain horizontal et cible lambertienne avec couplage partiel des phénomènes de diffusion et d'absorption

Dans le cas où l'on prend en compte la dépendance entre l'absorption par la vapeur d'eau et la diffusion par les aérosols, l'équation 7 devient:

$$(\rho^{sat})^{j=1,2,3} = \rho_R T_{gaz}^{AG} + \rho_A (T_{gaz}^{AG+H_2O})^{j=1,2,3} + T_{gaz}^{AG+H_2O} \left[ \frac{T^\downarrow}{1 - S_{alb}\rho_{env}} (t_{dir}^\uparrow \rho_{sol} + t_{diff}^\uparrow \rho_{env}) \right] \quad (8)$$

La réflectance atmosphérique est divisée en une composante introduite par les molécules des gaz (premier terme de droite) et une autre par les aérosols (second terme de droite). L'indice  $AG$  signifie « Autres Gaz » que la vapeur d'eau. Ainsi, le seul gaz qui pose problème est la vapeur d'eau qui est souvent concentrée aux basses couches atmosphériques là où l'aérosol est aussi concentré. Pour approcher l'interdépendance entre absorption par la vapeur d'eau et diffusion par l'aérosol, le code propose alors trois formulations différentes indiquées par  $j=1, 2, 3$  dans l'équation 8. Le premier cas correspond à une situation extrême où la vapeur d'eau a une influence minimale sur la luminance atmosphérique car elle est concentrée à une couche qui se trouve en dessous de la couche de l'aérosol ( $j=1$ ). Le troisième cas décrit aussi un cas extrême où la vapeur d'eau a maintenant un effet maximal car elle est surtout concentrée à une couche par-dessus la couche de l'aérosol ( $j=3$ ). Finalement le deuxième cas ( $j=2$ ) suppose que la moitié de la vapeur d'eau est concentrée à la même couche que l'aérosol et donc la vapeur d'eau possède un effet mitoyen entre les deux cas extrêmes.

## b- Formulation du logiciel REFLECT

La formulation de REFLECT est une généralisation des équations (7) et (8) afin d'inclure un terrain à topographie variable ainsi que des réflectances qui peuvent dévier de la lambertianité. L'explication de cette formulation est plus aisée avec des expressions impliquant des éclairements et des luminances. C'est ce que nous ferons ici dans un premier temps pour traduire le tout par la suite en terme de réflectance tel qu'utilisé dans 6S.

Les différentes sources d'éclairement dont l'intensité est modulée par une surface inclinée sont : (1) l'éclairement solaire transmis directement par l'atmosphère, (2) l'éclairement solaire diffusé par l'atmosphère qui parvient à la surface de toute direction du firmament (source hémisphérique) et (3) l'éclairement solaire total (direct et diffus) qui est réfléchi par le milieu environnant et qui parvient après réflexions multiples entre la terre et l'atmosphère à éclairer la surface visée (source hémisphérique). Ces trois types d'éclairement sont donnés par les équations suivantes :

- Éclairement solaire direct :  $E_{dir} = E_0 t_{dir}^{\downarrow} \cos i_s$ , le facteur  $\cos i_s$  représente le cosinus de l'angle d'incidence des rayons solaires en terrain incliné.

- Éclairement diffus du ciel :  $E_{diff,ciel} = E_{diff,ciel}^{Horiz} g_{ciel}$

Le facteur  $g_{ciel}$  tient compte des pertes en intensité de l'éclairement du firmament par rapport à celui incident à un terrain horizontal. Ces pertes sont encourues à cause du masquage des parties du firmament par la surface même, vue son inclinaison, ou par des éléments de surface inclinés qui entourent l'objet.

- Éclairement diffus dû aux réflexions multiples terre-atmosphère :  $E_{diff,env} = \frac{\bar{E}_{tot} \bar{\rho}_{env} S_{alb}}{1 - \bar{\rho}_{env} S_{alb}} g_{env}$

Le facteur  $g_{env}$  comme dans le cas précédent tient compte des pertes à cause du masquage des parties de l'hémisphère du ciel dues à l'inclinaison de la surface même et de son environnement.

Ces éclairements sont réfléchis dans la direction du capteur par la surface possédant ses propres facteurs de réflectance bidirectionnelle et de réflectance hémisphérique-directionnelle. Ainsi nous pouvons écrire les luminances par source d'éclairement comme suit :

- Luminance au sol due au rayonnement direct :  $L_{dir} = \frac{E_{dir}}{\pi} \rho_B$

- Luminance au sol due au rayonnement diffus du ciel :  $L_{diff,ciel} = (1/\pi)E_{diff,ciel}\rho_{HD}$
- Luminance au sol due aux réflexions multiples terre-atmosphère :  $L_{diff,env} = (1/\pi)E_{diff,env}\rho_{HD}$

En normalisant ces luminances à la manière de 6S (équations 5 et 6), nous aurons donc :

$$\rho_{dir} = t_{dir}^{\downarrow} \frac{\cos i}{\cos \theta_s} \rho_B$$

$$\rho_{diff,ciel} = t_{diff}^{\downarrow} g_{ciel} \rho_{HD}$$

$$\rho_{diff,env} = \frac{\bar{T}_{\downarrow} \bar{\rho}_{env} S}{1 - \bar{\rho}_{env} S} g_{env} \rho_{HD}$$

$\rho_B$  et  $\rho_{HD}$  sont respectivement les composantes bidirectionnelle et hémisphérique-directionnelle de la réflectance  $\rho_{sol}$ . Toutes ces réflectances sont transmises directement au capteur avec des pertes dues à la diffusion atmosphérique selon la transmittance  $t_{dir}^{\uparrow}$ .

D'autre part, l'effet d'adjacence peut être écrit en première approximation et en termes de luminance normalisée comme :

$$\rho_{adj} = \bar{T}_{\downarrow} t_{diff}^{\uparrow} \bar{\rho}_{env}$$

En homogénéisant toutes ces réflectances pour le dénominateur  $1 - \bar{\rho}_{env} S$  et en ignorant (à la manière de 6S) tous les termes impliquant les produits de deux réflectances et de l'albédo sphérique, parce que leur valeur tend vers zéro, nous aurons finalement une équation similaire à l'équation (7) :

$$\rho^{sat} = T_{gaz} (\rho_{atm} + \frac{t_{dir}^{\downarrow} \frac{\cos i_s}{\cos \theta_s} \rho_B t_{dir}^{\uparrow} + t_{diff}^{\downarrow} g_{ciel} \rho_{HD} t_{dir}^{\uparrow} + \bar{T}_{\downarrow} t_{diff}^{\uparrow} \bar{\rho}_{env}}{1 - S_{alb} \bar{\rho}_{env}}) \quad (9)$$

Les termes  $\bar{T}_{\downarrow}$  (affecté par l'altitude) et  $\bar{\rho}_{env}$  sont différents par rapport au cas du terrain horizontal à cause de la topographie variable. Les différents modèles utilisés pour représenter les paramètres liés à la topographie du terrain (notamment  $g_{ciel}$ ) ainsi que les facteurs de réflectance seront revus en détail à la partie II de la thèse.

### III-3 Modus operandi et intrants

#### III-3-1 Le code 6S

Les calculs des paramètres atmosphériques intervenant dans les équations (7) ou (8) sont effectués à 10 longueurs d'onde spécifiques choisies pour couvrir l'ensemble des fenêtres atmosphériques dans le visible et l'infrarouge (PIR et MIR) (Tableau III-1). Pour les autres longueurs d'ondes, l'estimation se fait par interpolation entre les valeurs calculées (avec un pas de 2.5 nm). Notons que dans la nouvelle version du 6S, ces calculs sont réalisés pour 20 longueurs d'onde (Tableau III-1). Ce raffinement est utile pour les capteurs ayant des bandes spectrales étroites du type hyperspectral. Il l'est moins pour les capteurs à bandes larges qui incluent parfois deux ou même plus de ces 20 longueurs d'ondes.

Tableau III-1. Longueurs d'onde de calcul des paramètres atmosphériques dans les versions de 1997 et de 2005 du code 6S

Version	Longueurs d'onde (µm)
6S (1997)	0.400, 0.488, 0.515, 0.550, 0.633, 0.694, 0.860, 1.536, 2.250, 3.750
6S (2005)	0.350, 0.400, 0.412, 0.443, 0.470, 0.488, 0.515, 0.550, 0.590, 0.633, 0.670, 0.694, 0.760, 0.860, 1.240, 1.536, 1.650, 1.950, 2.250, 3.750

Il est à noter que pour les calculs des transmittances de diffusion (directes et diffuses) ainsi que de la réflectance atmosphérique, l'AOD dans les 10 longueurs d'onde est estimée par extrapolation à partir de l'AOD à la longueur d'onde 550 nm selon la loi de puissance :

$$AOD(\lambda) = AOD_{550} \left( \frac{\lambda [nm]}{550 nm} \right)^{-a} \quad (10)$$

Le coefficient  $a$  varie entre 0 et 4, la valeur standard étant 2.

L'étape finale du calcul d'un paramètre quelconque  $p$  ( $T_{gaz}$ ,  $t_{dir}^{\downarrow}$ ,  $t_{diff}^{\downarrow}$ ,  $t_{dir}^{\uparrow}$ ,  $t_{diff}^{\uparrow}$ ,  $\rho_{am}$  ou  $S_{alb}$ ) est réalisée par intégration des valeurs calculées (interpolées) pour l'ensemble des longueurs d'ondes couvertes par une bande spectrale d'un capteur donné. Cette intégration se fait par la formule générale (comme pour l'équation 4) :

$$\bar{p} = \left( \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda) \cdot SS(\lambda) \cdot E_0(\lambda) \Delta\lambda \right) / \left( \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} SS(\lambda) \cdot E_0(\lambda) \Delta\lambda \right)$$

où  $\bar{p}$  est la moyenne du paramètre  $p$  pour la bande spectrale traitée,  $SS(\lambda)$  la sensibilité spectrale du capteur dans cette bande,  $E_0(\lambda)$  l'éclairement solaire spectral hors atmosphère et  $\Delta\lambda$  le pas de longueur d'onde (2.5 nm).

Des fichiers auxiliaires contenant les sensibilités spectrales d'un certain nombre des capteurs à haute résolution (ex. TM ou ETM+ de Landsat, HR de SPOT, etc.) sont fournis dans le 6S. Les spécificités des calculs et des intrants sont décrits succinctement dans ce qui suit. Pour plus de détails voir manuels d'utilisateur du code 6S (Vermote *et al.* 1997-c).

#### A- Éclairement et position du soleil

Le code 6S fait usage d'une table de l'éclairement solaire hors atmosphère  $E_0$  par longueur d'onde dans l'intervalle de 250 à 3000 nm avec un pas de 2.5 nm. Les angles zénithal ( $\theta_s$ ) et azimutal ( $\phi_s$ ) du soleil sont calculés à partir de la date et l'heure du passage du satellite et des coordonnées géographiques (lat/long) du lieu tel que spécifié par l'utilisateur. Le facteur d'ajustement de la distance terre-soleil ne dépend que de la date.

#### B- La position du capteur

Bien que la formulation du 6S incorpore la position du capteur (angles zénithal et azimutal de visée), pour les capteurs à haute résolution la visée est toujours supposée du nadir.

#### C- La transmittance gazeuse

Pour le calcul des transmittances gazeuses, le contenu en molécules de gaz est considéré constant et connu à l'exception de deux gaz : l'ozone et la vapeur d'eau. Les profils verticaux des ces deux gaz sont calculés à partir de leur contenu total dans l'atmosphère qu'il faut soit fournir au code, soit considérer des valeurs par défaut. Ces dernières peuvent être choisies parmi plusieurs modèles standard tel le US62, le *midlatitude summer* (MIDSUM), etc.

#### D- Les termes de diffusion

L'épaisseur optique des aérosols à 550 nm représente un intrant clé pour le calcul des termes de diffusion atmosphérique dans les équations (7) ou (8). Ce paramètre peut être fourni par l'utilisateur ou estimé approximativement par une routine appropriée à partir de la visibilité.

La composition chimique des aérosols est un autre intrant important pour estimer les termes de diffusion. Les types d'aérosols adoptés dans le code 6S et d'intérêt dans cette étude sont au nombre de quatre : les poussières (dust like), les solubles dans l'eau (water soluble), l'océanique (oceanic) et la suie (soot). Avec ces quatre aérosols, trois types d'atmosphères sont constitués : le continental, l'urbain et le maritime (tableau III-2).

Tableau III-2. Modèles d'atmosphère utilisés dans le code 6S (fractions par type d'aérosol).

	Poussières (dust-like)	Solubles dans l'eau (water soluble)	Océanique (oceanic)	Suie (soot)
Continental	0.7	0.29	0	0.01
Maritime	0	0.05	0.95	0
Urbain	0.17	0.61	0	0.22

Concernant les propriétés optiques des molécules des gaz utilisées pour calculer les termes de diffusion de Rayleigh, elles sont considérées fixes et les intrants nécessaires sont incorporés dans les routines du 6S.

#### E- Les réflectances

Le code 6S fournit une série de fichiers contenant les signatures spectrales d'un ensemble d'objets typiques (eau claire et turbide, végétation, etc.) qui peuvent être utilisés dans des exercices de simulation du signal. Particulièrement pour la réflectance de l'environnement, l'utilisateur peut choisir deux signatures spectrales différentes afin de simuler un objet visé (par exemple une masse d'eau) entouré d'un autre objet (par exemple une forêt). La dimension de l'objet visé (supposé circulaire de rayon  $r$ ) est fixée par l'utilisateur. La méthode de calcul de la réflectance de l'environnement est expliquée avec plus de détails dans la partie III.

#### F- L'altitude du terrain

L'altitude est un intrant important puisque tous les calculs des paramètres de diffusion et d'absorption en dépendent. Le code possède la sous-routine nécessaire pour ajuster les profils verticaux des différents paramètres définis plus haut en fonction de l'altitude du terrain.

### III-3-2 Le logiciel REFLECT

Le modus operandi de REFLECT est basé sur les mêmes principes que le 6S. Plusieurs procédures ont été cependant repensées afin d'accélérer les calculs, chose importante dans le cas des images de grande taille (plusieurs millions de pixels). Ces procédures sont expliquées en détail dans le prochain chapitre. Ici, nous passerons en revue les intrants de base ainsi que quelques spécificités de calcul.

#### A- L'intrant de base : la luminance mesurée par pixel

L'application du code 6S (sens inverse) nécessite la luminance mesurée par le capteur. Ainsi, pour chaque bande spectrale, les valeurs numériques sont transformées en luminance :

$$L^{sat}(\bar{\lambda}) = a_i VN_i + b_i \quad (11)$$

où  $L^{sat}$  est la luminance en unités physiques et  $VN_i$  la valeur numérique de l'image dans la  $i^{\text{ème}}$  bande spectrale désignée par son centre  $\bar{\lambda}$ . Les coefficients  $a_i$  et  $b_i$  sont déduits des valeurs du gain et de l'offset de la bande spectrale  $i$  de chacun des capteurs (voir équation 1).

Les capteurs visés par REFLECT sont les suivants : Landsat-4 et -5 TM, Landsat-7 ETM+, EO-1 ALI, SPOT 1 à 5 HR, ASTER, QuickBird et Ikonos. Ce sont les capteurs optiques à haute résolution et à très haute résolution les plus utilisés actuellement pour les applications de l'observation de la terre. Les courbes de sensibilité par bande spectrale ainsi que les coefficients d'étalonnage sont donnés dans l'annexe 4.

#### B- Éclairement solaire et position du soleil

REFLECT incorpore les routines ainsi que les données de base du 6S. Les informations nécessaires au calcul de la position du soleil (date, heure, coordonnées du centre de l'image) se trouvent habituellement dans les fichiers auxiliaires accompagnant les images et sont spécifiées par l'utilisateur.

Afin de vérifier la validité de l'utilisation des coordonnées du centre pour l'ensemble de l'image, nous avons calculé les paramètres atmosphériques pour le centre et l'extrémité d'une scène Landsat-7 entière (coordonnées approximatives de 46°N 73°O pour le centre et 45°N

72°O pour l'extrémité). Les écarts entre les résultats pour ces deux points sont très faibles ( $6 \cdot 10^{-5}$  pour  $T_{gaz}$ ,  $3 \cdot 10^{-3}$  pour  $t_{dir}^{\downarrow}$  et  $2 \cdot 10^{-4}$  pour  $\rho_{atm}$ ) et justifient cette simplification.

### C- La position du capteur

La majorité des capteurs de télédétection disponibles actuellement offrent l'option de la visée hors nadir (la série SPOT, QuickBird, Ikonos, ASTER). Il est donc important de prendre en considération la position du capteur.

Il y a deux façons de prendre en compte de l'angle de visée : soit au niveau du capteur (angle zénithal de visée) ou au niveau du sol (angle d'incidence de visée). Dans ce dernier cas, l'angle zénithal de visée est ajusté pour la courbure de la terre au lieu observé. La figure III-2 définit ces deux angles. Dans les calculs des paramètres atmosphériques, c'est l'angle zénithal qui importe car c'est lui qui définit le trajet ascendant du signal. Dans le cas des calculs plus précis de la FDRB du sol, c'est l'angle d'incidence de visée qui doit être utilisé. Dans les métadonnées, l'angle zénithal de visée est accompagné d'un signe. Si l'angle est positif ceci signifie que le capteur se trouve à l'est tandis qu'un angle négatif signifie que le capteur se trouve à l'ouest de la scène visée. Dans l'éventualité où l'angle d'incidence de visée est spécifié, il est accompagné du signe R (right looking) qui représente une visée de l'est, tandis que le signe L (left looking) indique une visée de l'ouest (satellites acquérant leurs données en orbite descendante).

L'angle azimutal de visée peut être calculé à partir de l'orientation de l'orbite, souvent fournie comme une métadonnée, et du sens de visée. Ainsi, si la visée est de l'ouest, il faut ajouter  $90^\circ$  à l'orientation de l'orbite pour trouver l'angle azimutal de visée. Dans le cas contraire, nous ajoutons  $270^\circ$  à l'orientation de l'orbite.

Pour faciliter la saisie des données, un programme informatique a été intégré dans REFLECT. Il reçoit comme intrants les métadonnées et donne comme extrant l'angle de visée, l'angle d'incidence de visée ainsi que l'angle azimutal de visée. Comme exemple de calcul nous présentons la conversion de l'angle de visée en angle d'incidence de visée. L'angle de visée peut être transformé en angle d'incidence de visée  $i_v$  par l'équation suivante (voir figure III-2) :

$$i_v = \text{asin}( (D/R_{\text{local}}) \cdot \sin(\theta_v) ) \quad (12)$$

- $i_v$  : l'angle d'incidence de visée pour une terre courbe,
- $D = h_{\text{sat}} + R_{\text{sat}}$  : distance satellite-centre de la terre, avec  $h_{\text{sat}}$  : hauteur du satellite et  $R_{\text{sat}}$  : rayon de la terre dans le nadir du satellite,
- $R_{\text{local}}$  : rayon de la terre au niveau du lieu visé,
- $\theta_v$  : angle de visée du satellite (généralement fourni avec l'image)

Une estimation assez précise de  $D/R_{\text{local}}$  impliquant la latitude du lieu ( $lat$ ) et l'altitude  $H$  est donnée par :

$$D/R_{\text{local}} = (h_{\text{sat}} + R_{\text{moyen}}) / R_{\text{moyen}} - \sin(lat)/794 - \cos(2lat)/602 - H/5627 \quad (13)$$

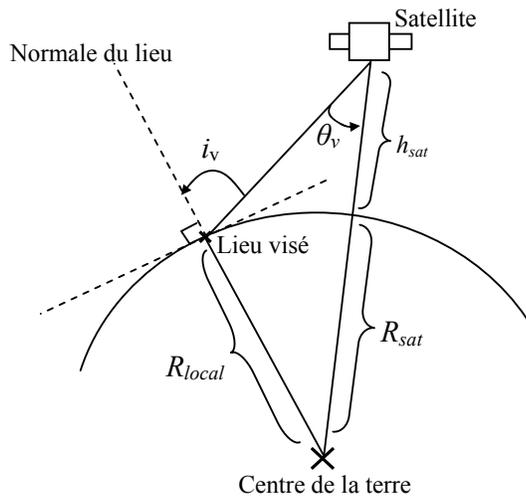


Figure III-2. Angle de visée du satellite en tenant compte de la courbure de la terre.

Dans le cas des satellites SPOT (1 à 5), la hauteur  $h_{\text{sat}}$  est de 832 km et le rapport  $D/R_{\text{local}}$  est de l'ordre de 1.13 (pour un rayon de la terre moyen de  $R_{\text{sat}} = R_{\text{local}} = 6367$  km). Les satellites QuickBird, Ikonos et Aster ont des altitudes de 450, 680 et 705 km, respectivement.

La figure III-3 montre que les valeurs de l'angle d'incidence de visée sont plus élevées que les angles de visée des satellites. Dans cette figure, nous avons effectué les calculs (avec l'équation 13) pour une hauteur de satellite de 830 km (SPOT), des latitudes allant de  $-60^\circ$  à  $60^\circ$  et des altitudes de terrain allant de 0 à 2 km. Toutefois, les différences entre les résultats sont tellement faibles que les courbes qui correspondent aux différentes latitudes et aux

différentes altitudes de terrain sont pratiquement confondues. La formulation simplifiée  $D/R_{\text{local}} = (h+R_{\text{moyen}}) / R_{\text{moyen}}$  a été donc retenue.

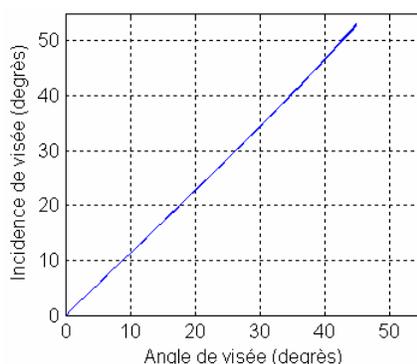


Figure III-3. Incidence de visée en fonction de l'angle de visée du satellite en tenant compte de la courbure de la terre.

#### D- La transmittance gazeuse

Le contenu en molécules de gaz atmosphériques est fixe et connu, à l'exception de la vapeur d'eau et de l'ozone. Tel que mentionné, 6S offre différents modèles standard de distribution verticale de ces deux constituants à défaut des mesures locales au moment du passage du satellite. Même dans ce cas, il est possible de rendre les calculs plus précis pour le lieu et la date d'acquisition en se servant des données tabulées ou des données météorologiques (Iqbal, 1984). Nous avons donc introduit cette option dans REFLECT en intégrant des données tabulées pour l'ozone ainsi qu'une formule empirique permettant d'estimer le contenu total de l'atmosphère en vapeur d'eau en utilisant des mesures habituellement prises dans une station météorologique.

À titre d'exemple la table utilisée (source : Office Mondiale de la Météorologie, OMM), donne de janvier à décembre à des latitudes moyennes, les valeurs suivantes pour le contenu total en ozone (cm-atm) : 0.3, 0.3, 0.3, 0.36, 0.355, 0.34, 0.32, 0.305, 0.29, 0.29, 0.29 et 0.29, respectivement. La formule utilisée pour la vapeur d'eau est celle de Leckner (Iqbal, 1984) :

$$w = 0.493 H_r P_s / T_a \quad (14-a)$$

où  $w$  est le contenu en vapeur d'eau intégré le long de la colonne atmosphérique (en  $g\ cm^{-2}$ ),  $H_r$  est l'humidité relative (en fraction de 1),  $T_a$  est la température ambiante en degrés Kelvin,

et  $P_s$  est la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air saturé donnée par l'équation semi empirique suivante :

$$P_s = \exp(26.23 - 5816/T_a) \quad (14-b)$$

Les calculs dépendent aussi des profils verticaux de pression et de température qui sont déduits par un des modèles atmosphériques standards inclus dans le code. Ces profils verticaux de température et de pression sont utilisés pour calculer la diffusion des molécules des gaz atmosphériques à partir de la théorie de Rayleigh (annexe 2).

### **E- Les termes de diffusion**

Concernant les termes de diffusion liés aux molécules des gaz, la formulation utilisée est la même que celle du 6S. Plusieurs modifications ont cependant été apportées en ce qui a trait aux propriétés optiques des aérosols. Ces modifications sont décrites en détail dans la partie II de la thèse. En résumé, ces modifications concernent :

- l'introduction d'un nouveau modèle de calcul des propriétés optiques de l'aérosol (modèle OPAC, Hess *et al.* 1998).
- L'adoption d'une nouvelle loi d'extrapolation de la profondeur optique connue à 550 nm aux autres longueurs d'onde que celle du 6S donnée dans la section précédente.
- Différentes approches d'estimation de l'AOD dont la méthode des cibles obscures.

### **F- La réflectance de l'environnement**

Selon la formulation expliquée plus haut, la réflectance de l'environnement doit être évaluée avant de calculer la réflectance au sol afin de corriger l'effet d'adjacence. Une nouvelle approche de calcul a été élaborée dans cette recherche. Elle est décrite dans la partie II.

### **G- L'altitude et le relief topographique**

Les routines de 6S pour ajuster les paramètres selon l'altitude de l'objet ont été intégrées dans REFLECT. Dans le cas d'une altitude variable, l'introduction d'un modèle numérique d'altitude est nécessaire. Également ce modèle sert à la création des modèles numériques des pentes et des azimuts de pente utilisés dans le calcul des effets topographiques. Les méthodes adoptées pour le calcul de ces effets sont présentées dans la partie II de cette thèse.

## **CHAPITRE IV - Structure informatique**

### **IV-1 Introduction**

La version de l'algorithme REFLECT développée dans le cadre de cette recherche, a été entièrement programmée en langage C++ qui est reconnu pour sa rapidité et sa robustesse. En parallèle, toutes les routines ont également été programmées en Matlab car ce dernier offre de très bonnes possibilités de visualisation et de vérification des résultats. Étant un interpréteur plutôt qu'un compilateur, Matlab permet plus aisément d'exécuter indépendamment des portions de programme et de vérifier ainsi chaque routine séparément. En plus, le fait de réaliser le même programme dans deux langages différents a permis une détection rapide des erreurs de transcription qui sont presque inévitables dans un programme de plus de 10 000 lignes. La réécriture en C++ a permis d'améliorer considérablement le temps de calcul par rapport à la version antérieure de REFLECT (un rapport de 10). Nous avons ensuite ajouté une version de calcul rapide de la réflectance au sol (autre réduction du temps de calcul) et élargi le champ d'applications aux images multispectrales autres que les ETM+ de Landsat-7 (les seules prises en compte dans la version antérieure) : images TM des satellites Landsat-4 et -5, images des SPOT 1 à 5, ALI de EO-1, QuickBird, Ikonos et ASTER de Terra. Nous l'avons également doté d'une interface graphique réalisée sous Visual C++. Ce chapitre présente l'architecture du logiciel, les étapes d'exécution ainsi que son interface graphique.

### **IV-2 Étapes de calcul**

REFLECT est organisé de manière modulaire afin d'alléger le programme principal qui calcule la réflectance au sol. L'organigramme de la figure IV-1 illustre les étapes de calcul de la réflectance au sol (notées  $R_i$ ) et celles qui servent pour l'estimation de l'AOD à l'aide de la méthode des cibles obscures (notées  $A_i$ ) par un processus itératif. Les étapes qui concernent le calcul des paramètres atmosphériques moyennant les routines du code 6S sont communes aux deux calculs et sont notées ( $C_i$ ).

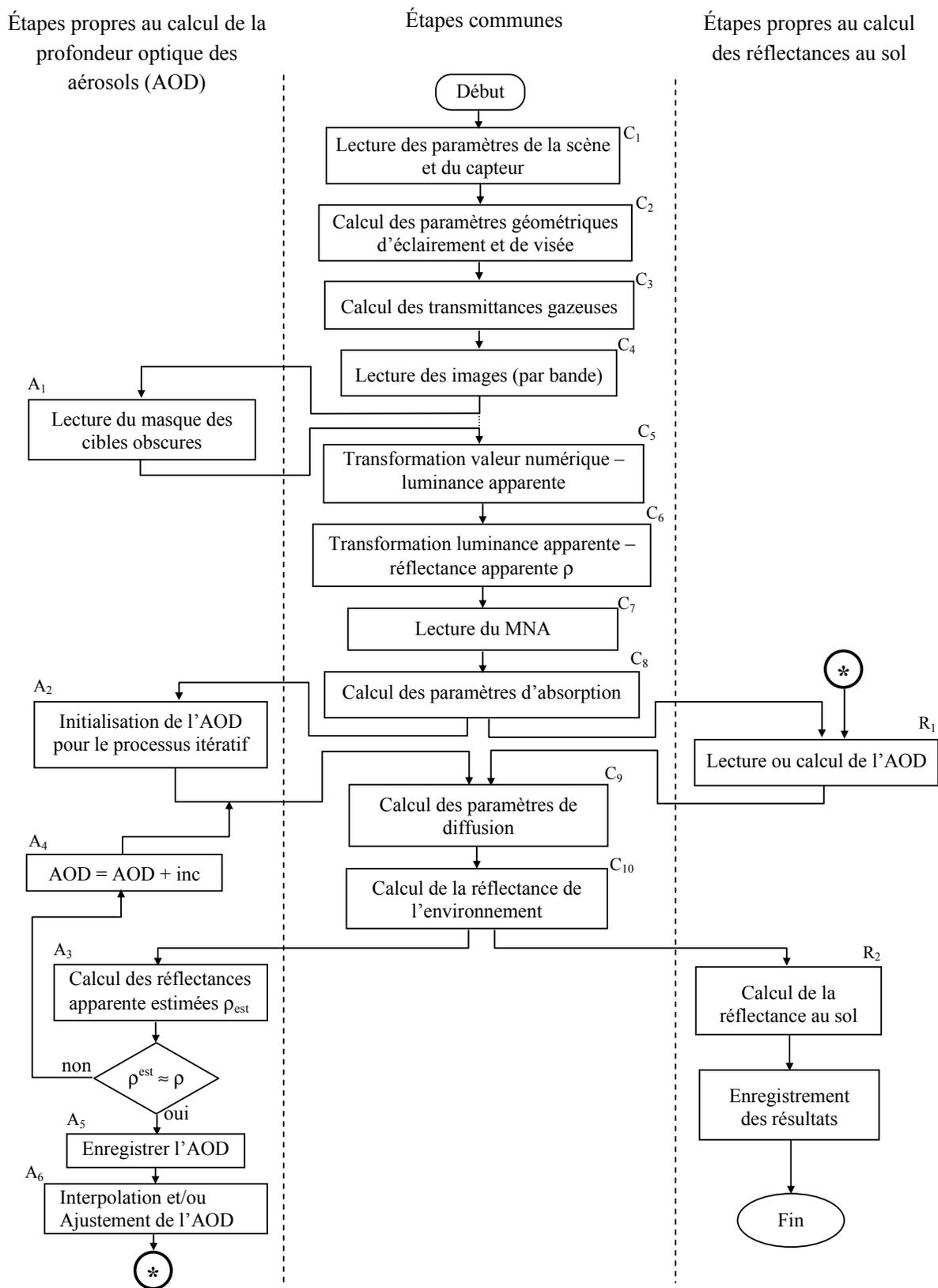


Figure IV-1. Organigramme du logiciel REFLECT. Étapes pour le calcul de la réflectance au sol et pour l'estimation de l'AOD par le processus itératif de la méthode des cibles obscures.

À l'exécution de REFLECT, la fenêtre de la figure IV-2 s'ouvre. Elle est constituée essentiellement de boutons de commande correspondant chacun à une étape de calcul. Les boutons sont groupés et numérotés suivant l'ordre (chrono)logique de déroulement des calculs. Toutefois, le respect de cet ordre n'est pas obligatoire si les intrants (fichiers) nécessaires à une quelconque étape sont déjà disponibles (calculés précédemment). Nous examinerons ici chacune de ces étapes indiquées dans la fenêtre principale en se référant à l'organigramme de la figure IV-1.

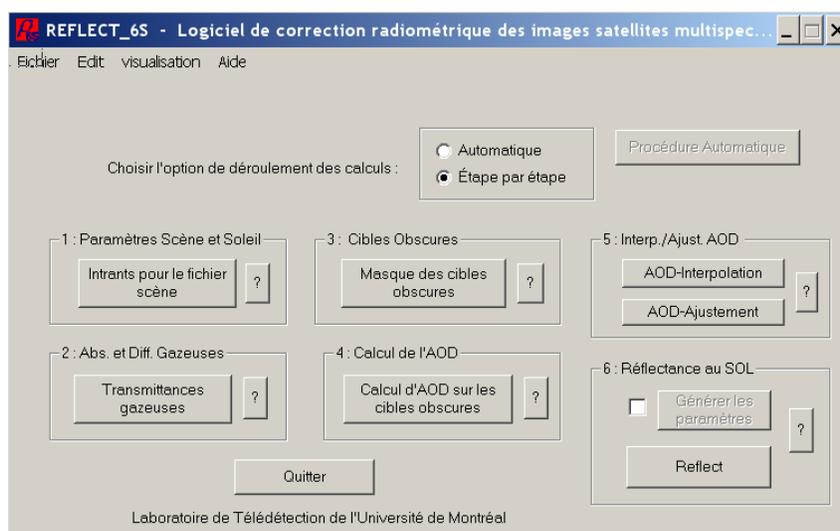


Figure IV-2. Fenêtre principale de l'interface graphique de REFLECT.

#### IV-2-1 Paramètres « scène » et « soleil »

Le choix de l'étape 1 dans la fenêtre principale amène à la fenêtre de la figure IV-3. C'est l'Étape  $C_1$  de l'organigramme de la figure IV-1. La fenêtre permet la saisie des données de base incluant le capteur, le mois, le jour, l'heure, la longitude, la latitude, les altitudes minimale et maximale, la taille et la résolution de l'image et les options ou les valeurs des gains et offsets employées par bande spectrale du capteur. Ces données sont stockées dans un fichier texte appelé « scène » pour usage ultérieur.

Après la saisie des données, des routines appropriées sont invoquées afin de calculer les angles zénithal et azimutal d'éclairement et de visée ainsi que du facteur de correction de distance terre-soleil (Étape  $C_2$  de la figure IV-1).

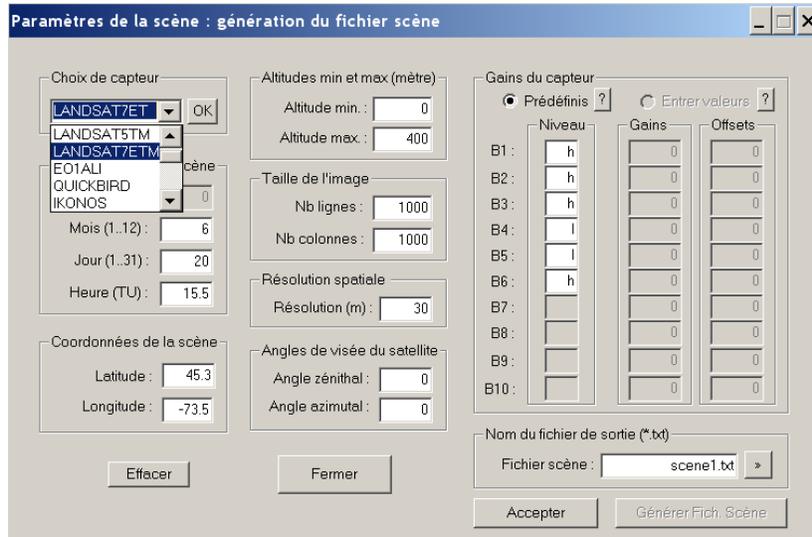


Figure IV-3. Fenêtre de saisie des paramètres de la scène dans REFLECT .

#### IV-2-2 Absorption et diffusion gazeuses

Le choix de l'étape 2 dans la fenêtre principale amène à la fenêtre de la figure IV-4. C'est l'*Étape C<sub>3</sub>* de l'organigramme de la figure IV-1. Tel que mentionné, les calculs pour tous les gaz pris en compte par le 6S (CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>O) se font en supposant des profils verticaux de pression et de température donnés par un modèle standard (ex. modèle de latitudes moyennes en été ou MIDSUM). Dans la version actuelle de REFLECT, seul le MIDSUM est retenu vu les lieux et la saison d'acquisition des images utilisées. REFLECT permet à l'utilisateur d'ajuster les profils verticaux de distribution de l'ozone et la vapeur d'eau en fonction de leur contenu total dans l'atmosphère, notamment à l'aide de données mensuelles pour l'ozone et de mesures météorologiques (humidité relative et température) pour la vapeur d'eau. Ces options sont introduites au moyen la fenêtre présentée ci-dessus.

Un module (programme) nommé « **Lut-Gaz** » est appliqué pour calculer les profils (34 niveaux répartis entre le sol et le sommet de l'atmosphère) des transmittances des gaz atmosphériques dans le sens descendant et ascendant. Il produit, pour chaque bande spectrale, un fichier texte contenant les transmittances gazeuses  $(T_g^{AG}, (T_g^{AG+H_2O})^{j=1,2,3}, \text{ et } T_g^{AG+H_2O}$  de l'équation 8) pour les longueurs d'onde comprises entre 0.4 et 2.4  $\mu\text{m}$  avec un pas de 2.5 nm pour les deux niveaux d'altitude minimale et maximale de la scène introduits dans l'étape 1. Les fichiers issus de « **Lut-Gaz** » sont appelés par les routines appropriées lors des étapes de

calcul de des réflectances au sol ou pour le calcul de l'AOD selon la méthode des cibles obscures (voir point IV-2-4 plus loin).

Dans cette étape, un autre fichier texte est généré, il contient les profils de pression et de température ajustés pour les altitudes minimum et maximum des lieux. Ces profils sont invoqués par les routines du programme principal pour le calcul des paramètres reliés à la diffusion atmosphérique.

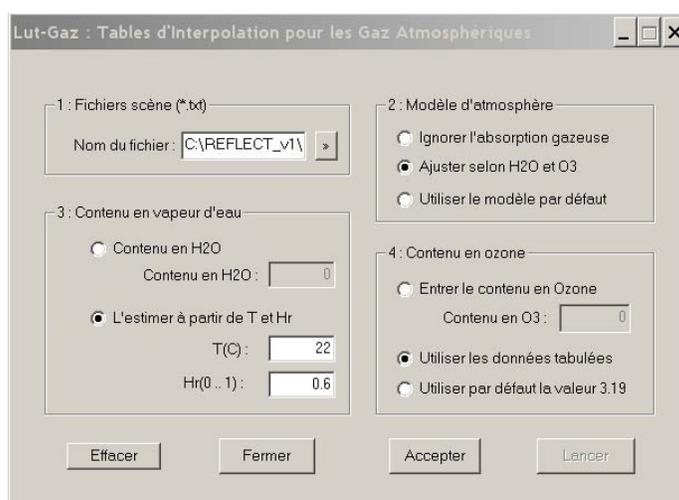


Figure IV-4. Fenêtre de calcul des transmittances gazeuses avec REFLECT.

### IV-2-3 Masque des cibles obscures

Le choix de l'étape 3 dans la fenêtre principale amène à la fenêtre de la figure IV-5. C'est une étape préalable à l'exécution du programme « **Dark** » (voir point 4) qui sert au calcul de l'AOD à partir des cibles obscures.

Cette fenêtre permet la saisie des données de base utilisées pour la localisation automatique sur les images des pixels pouvant être considérées comme des cibles obscures. Ces cibles sont de deux types : eau claire et profonde et forêt dense. Le choix se fait grâce à un groupe de boutons radio qui permettent d'utiliser soit l'un ou l'autre ou les deux à la fois. Selon le capteur et le choix des cibles obscures, l'utilisateur doit choisir les bandes spectrales appropriées qui seront utilisées pour la localisation des ces cibles. Par exemple, lorsque seule la forêt est sélectionnée, les zones d'édition des fichiers images des bandes autres que rouge et PIR ne sont pas nécessaires et sont ainsi désactivées.

Le programme « **Mask** » qui génère le masque des cibles obscures procède par seuillage automatique d'histogramme, comme décrit dans la partie II de la thèse. La sortie de ce programme est un fichier image (format 8 bits) où les pixels d'eau sont identifiés avec la valeur '1' et la forêt dense avec la valeur '2', les autres pixels prennent la valeur '0'. La visualisation de l'image du masque permet d'avoir une idée sur la distribution spatiale des pixels des cibles obscures. Si ces pixels sont concentrés seulement dans une partie de l'image alors que les surfaces d'eau claire et/ou de forêt dense sont réparties différemment, cela signifie que la brume atmosphérique n'est pas distribuée uniformément à travers la scène. Dans ce cas, l'algorithme appliqué à l'ensemble de l'image ne fait ressortir que les pixels obscurs dans la partie de l'image la moins affectée par la brume. Afin de palier à ce problème, l'utilisateur peut choisir de subdiviser l'image en NxM sections. La recherche des cibles obscures par seuillage s'appliquera alors à chacune des subdivisions de l'image indépendamment des autres. Cette approche de subdivision de l'image a également été proposée par Ahern *et al.* (1979) et Teillet *et al.* (1987). Nous avons également ajouté une option de choix manuel des seuils autour des seuils automatiques calculés appelée "Degré de sévérité" ce qui permet à l'utilisateur d'être plus ou moins sévère quant à décider si un pixel est obscur ou pas.

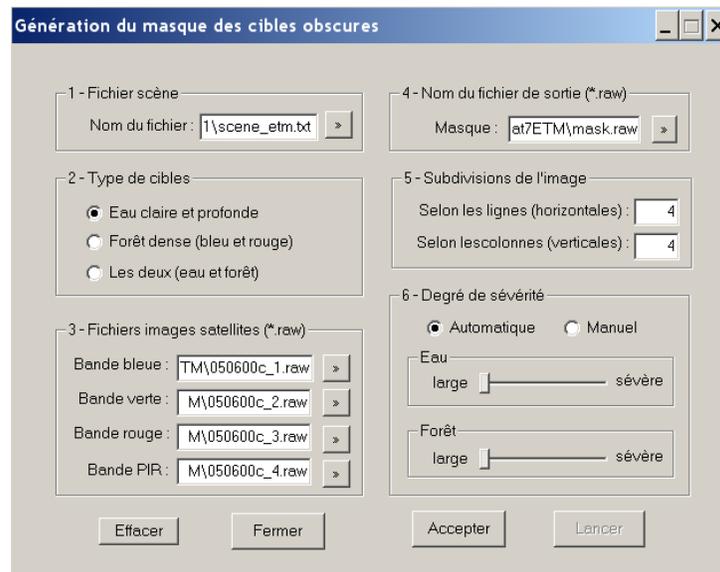


Figure IV-5. Fenêtre de génération du masque des cibles obscures avec REFLECT.

#### IV-2-4 Calcul de l'épaisseur optique des aérosols

Le choix de l'étape 4 dans la fenêtre principale amène à la fenêtre de la figure IV-6. Cette fenêtre permet de saisir toutes les données nécessaires au calcul de l'épaisseur optique d'aérosol incluant :

- le fichier « scène », contenant les paramètres de la scène et généré au début du processus,
- le nom de fichier et le numéro de bande de l'image à traiter,
- le fichier MNA (float 32 bits ou integer 16 bits) dans le cas d'une topographie variable, sinon une valeur d'élévation constante,
- le nom du fichier masque des cibles obscures créé au point VI-2-3,
- le pas d'échantillonnage définissant le nombre des cibles obscures à utiliser afin de réduire le temps de calcul,
- un nom de fichier texte de sortie.

L'algorithme de calcul de l'épaisseur optique des aérosols « **Dark** » à 550 nm, tel que requis par le code 6S, est un module d'importance dans la panoplie des programmes composant le logiciel. Il fait appel aux routines du code 6S et permet d'estimer grâce au processus itératif l'épaisseur optique d'aérosol qui produirait la réflectance apparente observée par le capteur au-dessus d'une cible obscure (voir partie III pour des explications détaillées). Le seuil de convergence a été fixé à 0.0005 unités de réflectance. Après les étapes de lecture des données de la scène, les effets des gaz atmosphériques et les propriétés d'absorption sont calculés par les routines du code 6S (*Étapes C<sub>1</sub> à C<sub>8</sub>* de la figure IV-1) pour les pixels obscurs lus à partir du fichier masque (*Étape A<sub>1</sub>* de la figure IV-1) généré par la procédure décrite précédemment. Le processus itératif est initié à une valeur arbitraire de la profondeur optique de l'aérosol à 550 nm (par exemple 0.25). Les routines appropriées du code 6S permettent ensuite de calculer les paramètres de diffusion pour cette valeur de profondeur optique de l'aérosol (*Étape C<sub>9</sub>* de la figure IV-1) et de simuler la luminance apparente au-dessus d'une cible obscure (*Étape A<sub>3</sub>* de la figure IV-1).

Si pour la plupart des pixels la convergence est obtenue après quatre ou cinq itérations, nous avons constaté dans certains cas l'existence de pixels qui ne convergeaient jamais, bloquant ainsi le déroulement des calculs. Nous avons donc apporté les modifications suivantes : si le nombre d'itérations dépasse les 20, le seuil de convergence est augmenté à 0.005, si après 20

autres itérations le calcul n'a pas encore convergé, ce pixel est abandonné et nous passons au pixel suivant. Notons que la proportion de tels pixels ne dépasse pas 1%.

L'utilisateur peut traiter l'ensemble des cibles obscures ou bien choisir un échantillonnage systématique de l'image. Les résultats des calculs sont stockés (*Étape A<sub>5</sub>* de la figure IV-1) dans un fichier texte pour être employés par la suite par le programme associé à l'étape 5 de la fenêtre principale tel qu'expliqué par la suite.

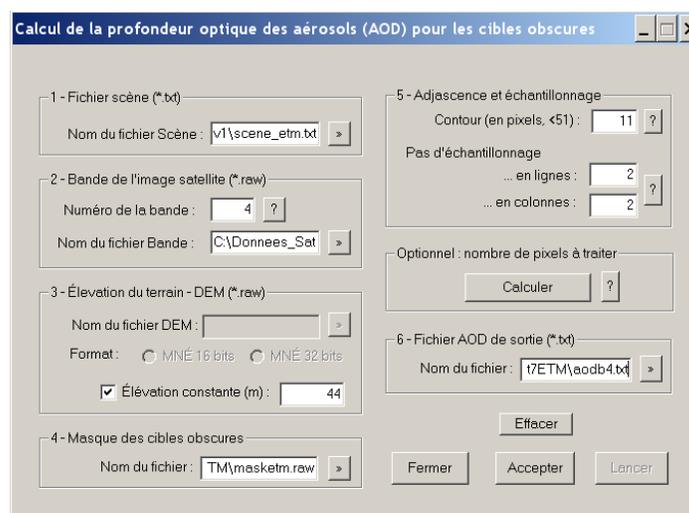


Figure IV-6. Fenêtre de calcul de l'AOD par la méthode des cibles obscures de REFLECT.

#### IV-2-5 Interpolation ou ajustement de l'épaisseur optique d'aérosols

L'étape 5 dans la fenêtre principale permet de choisir la façon de généraliser les résultats du programme « **Dark** » à l'ensemble des pixels de l'image. Ceci se fait par le programme « **Interp** » d'interpolation à tous les pixels de l'image ou bien par un ajustement polynomial (programme « **Ajuste** ») en fonction des coordonnées ligne-colonne des pixels de l'image (*Étape A<sub>6</sub>* de la figure IV-1). L'interpolation est basée sur un calcul de moyenne pondérée par l'inverse de la distance élevée à une puissance  $n$ . La puissance  $n$  nous permet d'avoir une interpolation plus ou moins lissée. Une option de calcul du mode de l'épaisseur optique calculée à partir de plusieurs bandes est aussi disponible. Les extrants sont soit une image avec les valeurs des pixels représentant les AOD interpolées soit un fichier texte avec les coefficients des polynomiales ajustées aux AOD estimées sur les pixels obscurs. Si le terrain est à topographie variable, les calculs d'interpolation ou d'ajustement se font en rapportant les AOD estimées au-dessus des cibles obscures au niveau de la mer en inversant l'équation

suivante :  $AOD_{550}(H)=AOD_{550}(0) \exp(-H/H_a)$ , où  $H_a$  est l'altitude-échelle pour l'aérosol fixée à 2 km dans 6S.

#### IV-2-6 Réflectance au sol

L'étape 6 est l'étape ultime des calculs. L'utilisateur a deux choix : a) générer les paramètres ou b) appliquer le programme « **Reflect** ». La première option offre la possibilité de calculer tous les paramètres impliqués dans la relation entre la valeur numérique et la réflectance au sol (capteur, éclairage solaire, transmittances gazeuse, transmittances de diffusion atmosphérique, réflectance de parcours) sous des conditions simplifiées d'une épaisseur optique d'aérosol et d'une altitude de terrain constantes (figure IV-7). Avec ces paramètres, il est possible de générer les images de réflectance avec les calculateurs d'image disponibles dans les logiciels de télédétection. La saisie des données nécessaires à la création du fichier de sortie contenant les paramètres se fait via la fenêtre suivante. Dans ce cas, l'effet d'adjacence ne sera pas pris en compte.

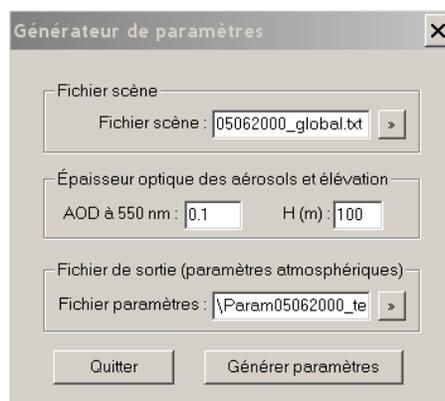


Figure IV-7. Fenêtre de génération des paramètres atmosphériques à partir du fichier scène et des intrants AOD et hauteur du lieu.

L'option « **Reflect** » amène à la fenêtre de la figure IV-8. Cette fenêtre sert à la saisie des données nécessaires à l'estimation de la réflectance au sol par le programme « Reflect » ainsi qu'à la définition de son mode d'exécution (rapide ou normal). Les données nécessaires sont :

- le nom du fichier « scène »,
- le nom du fichier contenant l'image à corriger (en format raw) et le numéro de la bande,
- le fichier MNA (float 32 bits ou integer 16 bits) sinon une valeur d'élévation constante,

- le nom du fichier de l'AOD à 550 nm (fichier image issu du programme « Interp » ou fichier texte contenant les coefficients d'ajustement en fonction des lignes et des colonnes),
- les modèles numériques de pente et d'orientation de pente si les corrections topographiques sont requises.

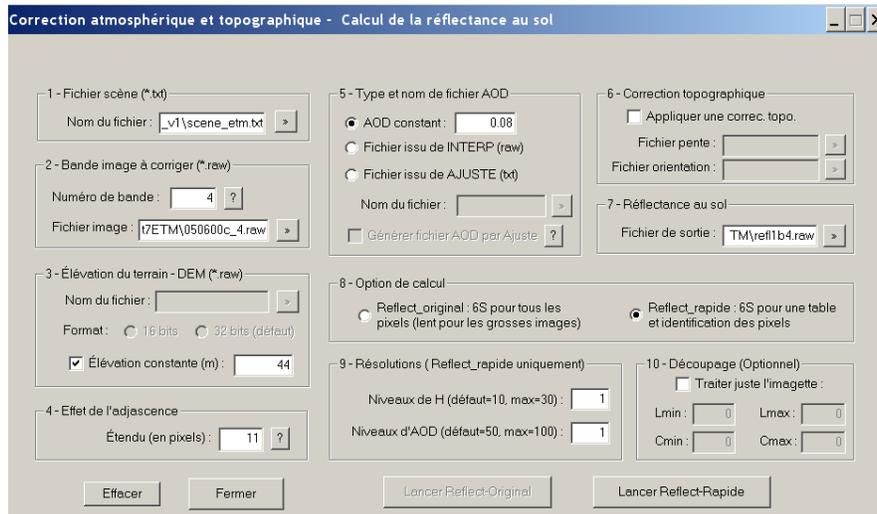


Figure IV-8. Fenêtre d'application des corrections atmosphériques et/ou topographiques.

### L'option normale (voir aussi annexe 5)

Le choix de l'option normale amène à l'exécution du programme « **Reflect** » (*Étapes  $R_1$  à  $R_3$*  de la figure IV-1). Le programme procède pixel par pixel de l'image (selon la bande spectrale) avec transformation des valeurs numériques en réflectances apparentes (*Étapes  $C_4$  à  $C_6$*  de la figure IV-1) puis estimation de la réflectance au sol en fonction du choix implicite de l'utilisateur (avec ou sans MNA) pour un terrain horizontal ou incliné en se servant de la formulation appropriée. Les paramètres atmosphériques (transmission et diffusion) sont ajustés pour l'altitude du pixel et le programme invoque la routine pour le calcul de la réflectance de l'environnement (*Étapes  $C_8$  à  $C_{10}$*  de la figure IV-1). Dans le cas d'un terrain à topographie variable, la profondeur optique à 550 nm correspondant au pixel traité est retrouvée par l'équation citée au point IV-2-5 en utilisant la valeur de la profondeur optique au niveau de la mer (connue par interpolation ou ajustement) et l'altitude du pixel. Également dans le cas d'un terrain à topographie variable, les calculs des paramètres décrivant les effets topographiques (voir Partie II) sont intégrés dans l'*Étape  $R_2$*  (figure IV-1).

## L'option rapide

Dans l'option normale, les routines multi-itérations du code 6S qui nécessitent le plus de temps de calcul sont appelées pour tous les pixels de l'image. Or, pour ces étapes, les pixels ne sont différents que par leur altitude  $H$  et leur AOD. Ainsi, et afin de réduire le temps de calcul de la réflectance, une option de «calcul rapide» a été ajoutée. Les paramètres atmosphériques d'intérêt ( $T^\downarrow$ ,  $t_{dir}^\uparrow$ ,  $t_{diff}^\uparrow$ ,  $\rho_{atm}$  et  $S_{alb}$ ) sont d'abord calculées pour un certain nombre de valeurs de l'altitude  $H$  et l'AOD (si celles-ci ne sont pas constantes, sinon une seule valeur sera considérée pour chacun des deux facteurs). Une table 2D de paramètres atmosphériques est constituée. Ensuite, les pixels de l'image sont corrigés en choisissant dans la table les paramètres qui correspondent à l'altitude et à l'AOD les plus proches de ceux du pixel traité. Les gammes dynamiques de  $H$  et de l'AOD sont assez limitées, l'épaisseur optique varie en pratique entre 0.05 et 0.5 et l'étendue des altitudes est de quelques centaines de mètres. L'idée est de quantifier convenablement (quantification non linéaire) les intervalles  $[H_{min}, H_{max}]$  et  $[AOD_{min}, AOD_{max}]$ . À titre d'exemple, si on choisit une table de taille 80 niveau d'AOD par 30 niveaux de  $H$  pour une image de dimension 2400x2400, le temps de calcul est divisé par 2400 par rapport à l'option précédente qui consiste à appliquer les routines du code 6S à tous les pixels. Une fois les paramètres atmosphériques calculés, le calcul des réflectances au sol pour les pixels de l'image ne prend que quelques secondes compte tenu de la procédure très rapide d'adressage des paramètres atmosphériques dans la table 2D pré-établie. Le temps de traitement d'une image complète est ainsi réduit à quelques minutes par bande spectrale.

## IV-3 Ordre de communication des programmes

L'organisation de la communication entre les différents programmes ainsi que les fichiers mis en jeu sont illustrés sur la figure IV-9. Un certain ordre de déroulement des calculs doit être respecté. Toutefois, si par exemple les fichiers nécessaires à l'exécution d'un programme ont été préalablement générés, il est bien sûr possible de lancer directement ce programme.

Tel que mentionné, les intrants nécessaires pour effectuer une correction radiométrique avec REFLECT sont :

- les images satellitales pour les bandes à corriger,
- les paramètres de la scène (capteur, date, heure et coordonnées lat/long),

- éventuellement, la température et l'humidité relative pour estimer le contenu en H<sub>2</sub>O dans l'atmosphère,
- le modèle numérique d'altitude s'il est disponible.
- les modèles numériques de pente et d'orientation de pente si les corrections topographiques sont requises.

Toutes les autres informations et les tous les autres fichiers sont générés par le logiciel. La sortie finale est un fichier image 32 bits contenant les valeurs des réflectances au sol.

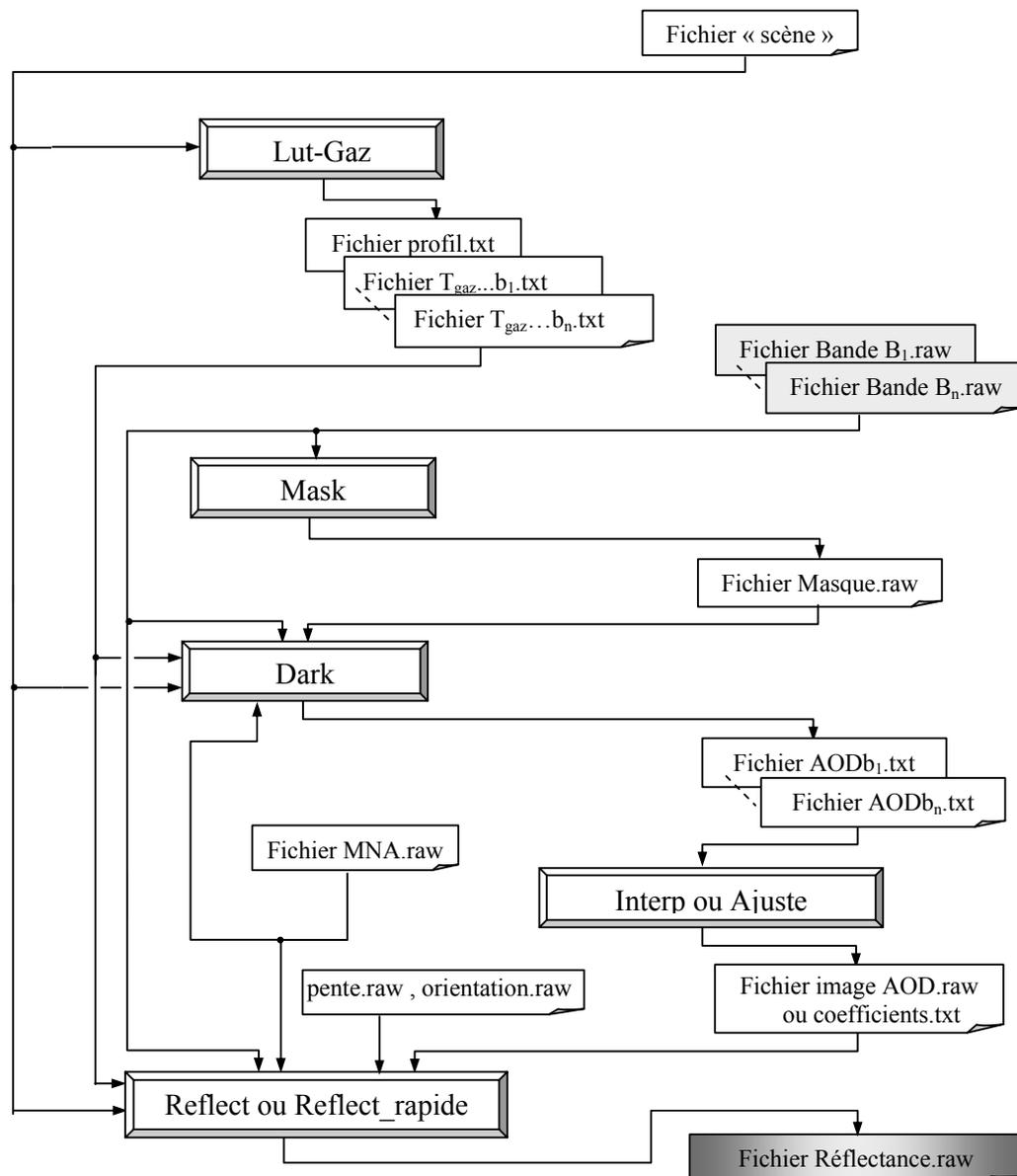


Figure IV-9. Organisation de la communication entre les programmes de REFLECT.

## **DEUXIÈME PARTIE**

### **Le logiciel REFLECT : développements spécifiques et validations**

Cette partie traite en premier lieu d'une série de nouvelles procédures et modèles intégrés dans REFLECT, leur justification ainsi que leur validation. Ces nouveaux développements sont présentés dans les trois premiers chapitres et concernent respectivement : 1) les propriétés optiques des aérosols (chapitre V) ; 2) la méthode des cibles obscures (chapitre VI) et 3) la modélisation et le calcul de l'effet d'adjacence (chapitre VII). Le chapitre VIII décrit une série de tests de validation des calculs du logiciel REFLECT de réflectances au sol en terrain plat. Cette partie se termine par la modélisation et la validation des corrections des effets topographiques (chapitre IX).

## **CHAPITRE V - Les aérosols**

Les aérosols sont des petites particules en suspension dans l'air. Leur interaction avec le rayonnement solaire se traduit par une diffusion et, en moindre importance, une absorption (considérée sans signification dans le code 6S). La taille des aérosols s'étend du centième de micron à quelques dizaines de microns. Leurs origines sont très variées, soit naturelle (soulèvement de poussières au sol par les vents, feux de forêts, volcans, pollen, vaporisation de l'eau de mer, condensation de gaz atmosphériques) soit liées à l'activité humaine (pollution industrielle, pollution urbaine). À un endroit donné de la terre, et selon la nature du lieu, un mélange de particules de différentes origines se trouve dans l'atmosphère au moment du passage du satellite.

Afin de modéliser les interactions entre les aérosols et le rayonnement solaire, nous devons connaître 1) leurs propriétés optiques (coefficients d'extinction et d'absorption, albédo de diffusion, paramètre d'asymétrie et fonction de phase) et 2) leur épaisseur optique. Les modifications apportées au code 6S sur ces questions sont décrites et justifiées dans les sections qui suivent.

### **V-1 Les propriétés optiques**

La connaissance des propriétés des aérosols est essentielle pour la télédétection car leur effet sur le rayonnement solaire est présent sur tout le spectre électromagnétique utilisé pour l'acquisition des images optique. Ces propriétés sont calculées à l'aide de la théorie de Mie à partir des propriétés microphysiques des particules (distribution de taille et indice de réfraction), en supposant qu'elles sont de forme sphérique (voir annexe 2). Or, la composition chimique des aérosols est très variable et dépend à la fois de la répartition géographique des sources et de la dynamique atmosphérique. La détermination de la proportion des différents types d'aérosols à un endroit et à un moment donnés n'est donc pas aisée. On a le plus souvent recours à des modèles standard qui impliquent la présence d'un mélange des particules typiques d'aérosol (poussières, solubles dans l'eau, suie, etc.) dont les propriétés optiques sont supposées connues et stables. En supposant différents mélanges des ces particules typiques, différentes atmosphères typiques sont constituées : continentale, urbaine, maritime, etc., selon l'approche utilisée dans le 6S dont on fait mention dans la partie I.

Comme les propriétés des aérosols sont fonction de la taille des particules, il faut noter un fait important : il existe dans l'atmosphère un type d'aérosol appelé « water soluble » dont la taille des particules augmente lorsqu'elles sont en contact avec des molécules de vapeur d'eau. Ceci contribue à modifier considérablement l'indice de réfraction et la section efficace des particules et ainsi, toutes les propriétés optiques de ce type d'aérosol (Shettle et Fenn, 1979; Hess *et al.* 1998 ; Aubé, 2003). Cette modification a un impact sur la valeur de l'AOD. Ainsi, pour les types d'atmosphère riches en aérosol « water soluble », notamment les mélanges continental et urbain se trouvant dans les régions les plus ciblées par la télédétection, on s'attend à ce que l'AOD soit plus élevé pour les valeurs élevées de l'humidité relative de l'air.

Afin de vérifier cette hypothèse et de montrer l'influence (ou non) de l'humidité relative de l'air sur la valeur de l'AOD, nous avons examiné la relation entre l'AOD mesuré par le radiomètre Microtops en région montréalaise (tableau II-2; ici, seules les données des sites du CRDH et de St-Valentin sont utilisées) et les mesures d'humidité relative acquises par la station météorologique la plus proche (L'Acadie, Québec) aux mêmes dates et heures.

La figure V-1 montre qu'il existe une relation proportionnelle (corrélation de 0.622) entre l'AOD et l'humidité relative. Ainsi, nous pouvons supposer que cette relation est due à la proportion d'aérosols de type « water soluble » présents dans l'atmosphère continentale (environ 50% d'après OPAC, tableau V-1 et environ 30% d'après le 6S, tableau III-2) et dont l'épaisseur optique augmente en fonction de l'humidité.

Pour les raisons susmentionnées, nous avons actualisé le modèle d'aérosol qui se trouve dans le code 6S (modèle publié en 1983 par la World Meteorological Organization) par un modèle plus récent (OPAC : Optical Properties of Aerosols and Clouds), présenté par Hess *et al.* (1998) et qui tient compte de l'effet de l'humidité relative sur les propriétés des aérosols et ultimement sur les valeurs de l'AOD. L'intégration de ce modèle dans le logiciel REFLECT ainsi que des comparaisons avec le modèle inclus dans 6S sont décrites dans ce qui suit.

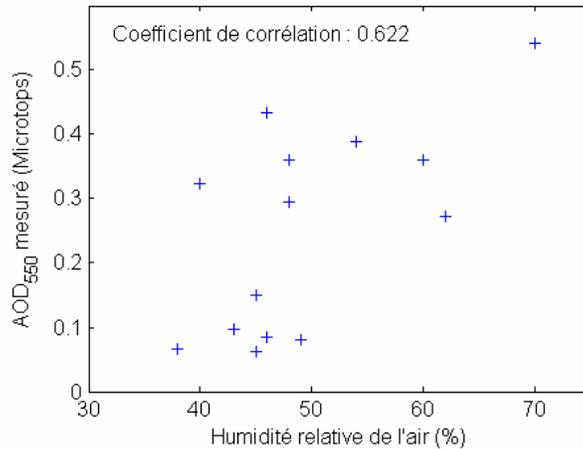


Figure V-1. Relation entre l'AOD à 550 nm mesuré par le radiomètre Microtops en région montérégienne, Québec, (St-Jean-sur-Richelieu et St-Valentin) et l'humidité relative de l'air donnée par une station météorologique proche (L'Acadie).

### V-1-1 Le modèle OPAC

Le modèle OPAC (Hess *et al.* 1998) décrit les propriétés optiques et microphysiques de 10 aérosols considérés comme les plus typiques ainsi que des mélanges de ces particules qu'on retrouve habituellement dans l'atmosphère. Les propriétés optiques sont : le coefficient d'extinction (EX), le coefficient (ou albédo) de diffusion (SC), le paramètre d'asymétrie (ASY) et la fonction de phase (PH). Les données sont disponibles pour 61 longueurs d'onde entre 0.25 et 40  $\mu\text{m}$  et 8 valeurs de l'humidité relative (pour le type « water soluble »). OPAC propose des modèles d'atmosphère (mélanges d'aérosols) plus nombreux que celui du 6S.

Les types de particules considérées dans le modèle OPAC sont :

- L'aérosol « water-insoluble » ou INSO, équivalent au « dust-like » du code 6S.
- Les aérosols de type « mineral », correspondant aux particules de poussière désertiques se trouvant dans les régions arides. Selon leur origine, ils sont au nombre de quatre : MINM (mineral nucleation mode), MIAM (mineral accumulation mode), MICM (mineral coagulation mode) et MITR (mineral-transported). Un seul type d'aérosol de ce type («desert »), est inclus dans 6S (Vermote *et al.* 1997-c).
- Les aérosols de type « water soluble » ou WASO, constitués de différentes particules solubles dans l'eau telles que les sulfates, les nitrates et autres matières d'origine organique. La taille de ces particules ainsi que leurs propriétés optiques sont fonction du taux d'humidité relative de l'air. Ces propriétés sont données à des taux de 0, 50, 70, 80 et 90 %. Les propriétés de ce type d'aérosol sont considérées stables dans le 6S.

- La suie (soot), identique à celle utilisée dans le code 6S. Ce sont les particules très absorbantes vu qu'elles sont constituées de carbone (noir). Le carbone n'étant pas soluble dans l'eau, les propriétés de ces particules ne sont pas liées à l'humidité relative de l'air.
- Deux types d'aérosols « sea salt », selon leur mode de formation, on distingue SSAM pour « sea salt, acc. mode » et SSCM pour « sea salt, coa. mode ».
- Les gouttelettes de sulfates (SULF) présentes dans l'atmosphère arctique.

OPAC propose dix mélanges de particules atmosphériques (table V-1) : continental propre (Cont. prop.), continental moyen (Cont. moy.), continental pollué (Cont. poll.), urbain, désertique, maritime propre (Marit. prop.), maritime pollué (Marit. Poll.), maritime tropical (Marit. trop.), arctique et antarctique. Pour chacune des combinaisons, les propriétés des aérosols sont calculées à l'aide d'une moyenne pondérée par les pourcentages de chaque aérosol dans le mélange.

Tableau V-1. Types d'atmosphères proposés dans le modèle OPAC.

	WASO	INSO	Suie	SSAM	SSCM	MINM	MIAM	MICM	MITR	SULF
<b>Cont. prop.</b>	0.591	0.409	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Cont. moy.</b>	0.583	0.396	0.021	0	0	0	0	0	0	0
<b>Cont. poll.</b>	0.658	0.298	0.044	0	0	0	0	0	0	0
<b>Urbain</b>	0.563	0.358	0.079	0	0	0	0	0	0	0
<b>Désertique</b>	0.018	0	0	0	0	0.033	0.747	0.202	0	0
<b>Marit. prop.</b>	0.071	0	0	0.908	0.021	0	0	0	0	0
<b>Marit. poll.</b>	0.16	0	0.006	0.814	0.019	0	0	0	0	0
<b>Marit. trop.</b>	0.058	0	0	0.928	0.014	0	0	0	0	0
<b>Arctique</b>	0.382	0.029	0.044	0.544	0	0	0	0	0	0
<b>Antarctique</b>	0	0	0	0.045	0	0	0	0	0.045	0.91

En comparant les propriétés optiques (EX, SC et ASY) des aérosols de type poussière (INSO et mineral) du modèle OPAC avec l'aérosol « dust » du code 6S (figures V-2 a à c), nous pouvons voir que les propriétés des particules INSO, qui remplacent les particules « dust » dans les types d'atmosphères communs (continental et urbain), possèdent un coefficient d'extinction, un albédo de diffusion et un coefficient d'asymétrie légèrement plus faibles que « dust ». Les courbes de ce dernier se situent entre celles d'INSO et MICM de OPAC. Les aérosols WASO de OPAC ont des coefficients d'extinction et de diffusion plus élevés que ceux du même type d'aérosol utilisé dans le code 6S (figures V-2 d et e). De surcroît, plus

l'humidité relative de l'aire est élevée plus ces coefficients le sont également puisque les particules sont plus grandes (captent plus de photons de par leur section efficace plus grande). Le paramètre d'asymétrie de WASO de OPAC est plus élevée pour les faibles longueurs d'onde et plus faible pour les longueurs d'onde supérieures à 1.5  $\mu\text{m}$  (figure V-2-f). Les aérosols « soot » sont par contre identiques pour les deux modèles (figure V-2 g à i).

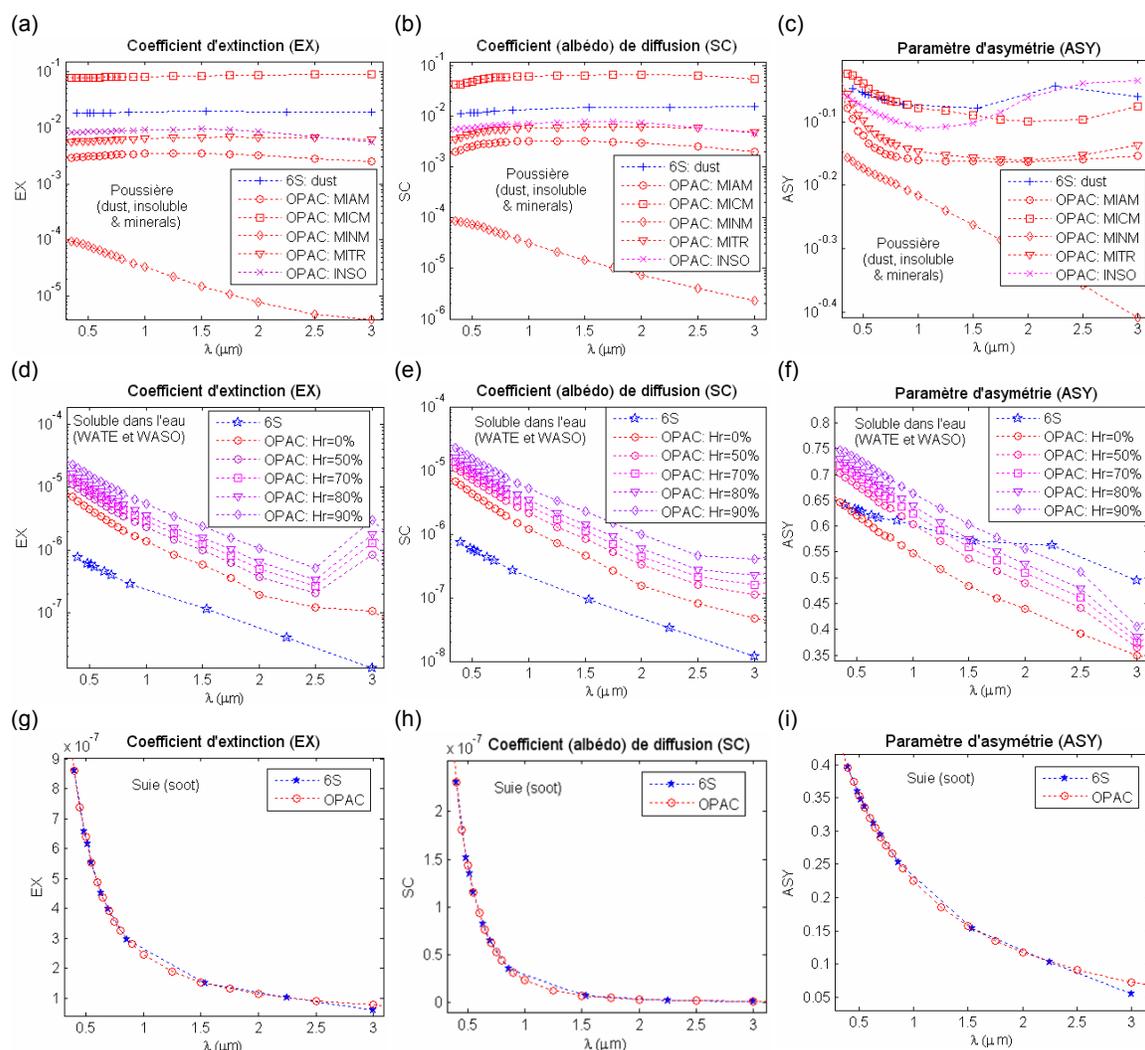


Figure V-2. Comparaison entre les propriétés (EX, SC et ASY) des aérosols du modèle OPAC et du code 6S.

Les fonctions de phase INSO de OPAC et « dust » du code 6S (figure V-3-a) sont assez proches et très directionnelles pour toutes les longueurs d'onde représentées (entre 0.4 et 3  $\mu\text{m}$ ). Les courbes de fonctions de phase des aérosols WASO du 6S se trouvent entre celles de OPAC pour les pourcentages d'humidité allant de 0% à 90% sauf pour les longueurs d'onde supérieures à 1.5  $\mu\text{m}$  où les fonctions de phase du WASO du 6S sont plus accentuées vers

l'avant (figure V-3-b). Pour la suite, les fonctions de phase sont presque identiques pour les deux modèles, avec beaucoup de rétrodiffusion aux longueurs d'onde élevées (figure V-3-c).

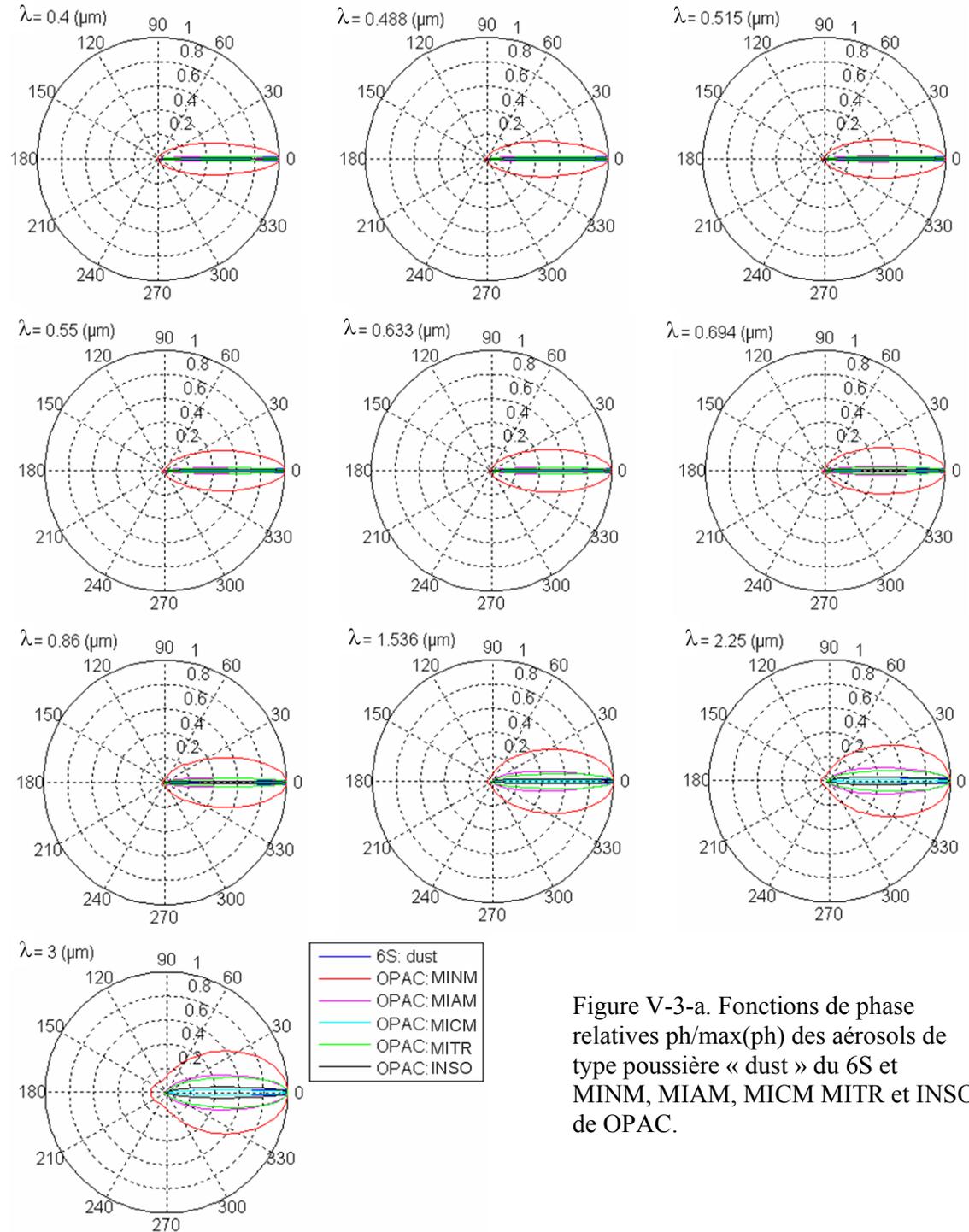


Figure V-3-a. Fonctions de phase relatives  $ph/\max(ph)$  des aérosols de type poussière « dust » du 6S et MINM, MIAM, MICM MITR et INSO de OPAC.

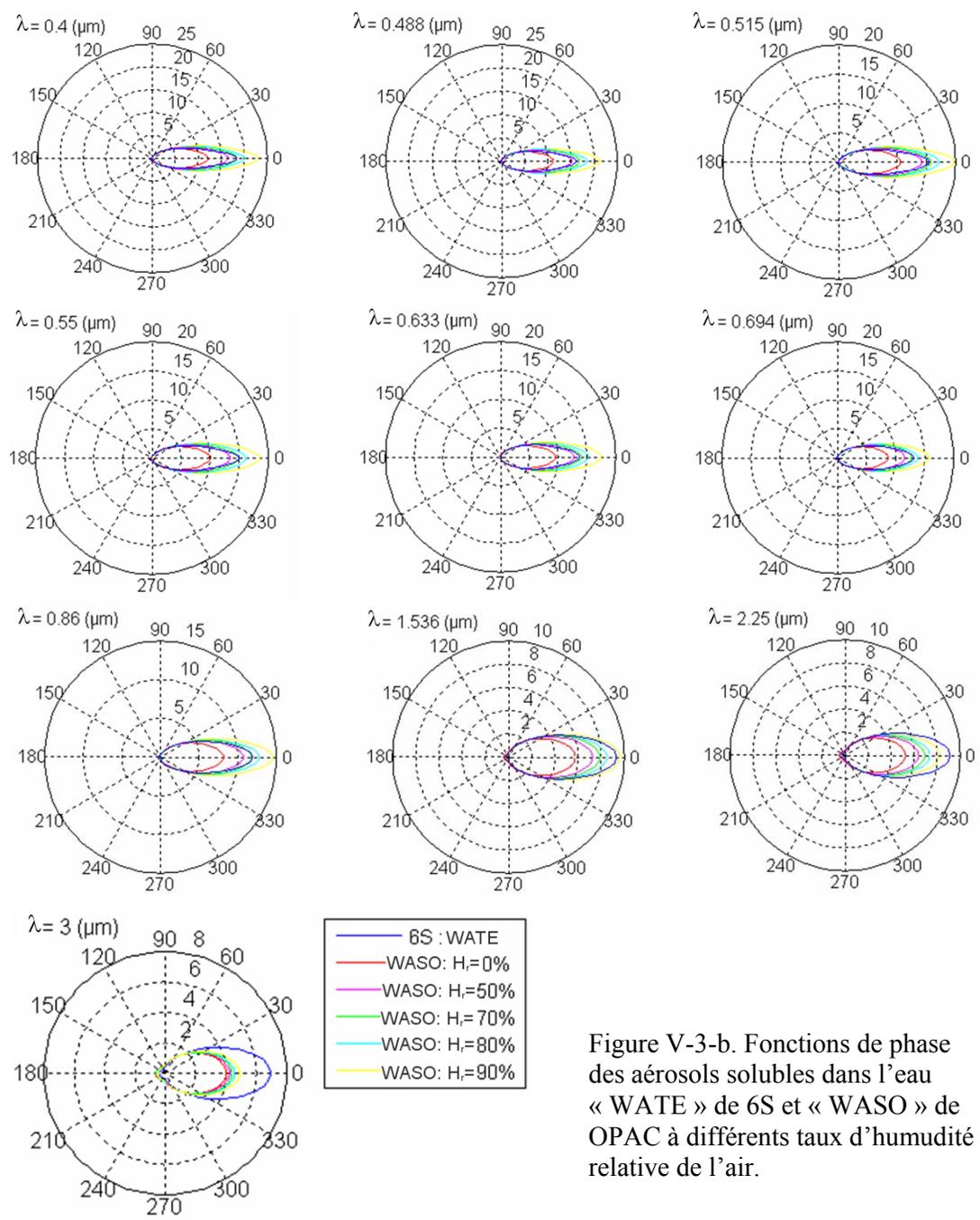


Figure V-3-b. Fonctions de phase des aérosols solubles dans l'eau « WATE » de 6S et « WASO » de OPAC à différents taux d'humidité relative de l'air.

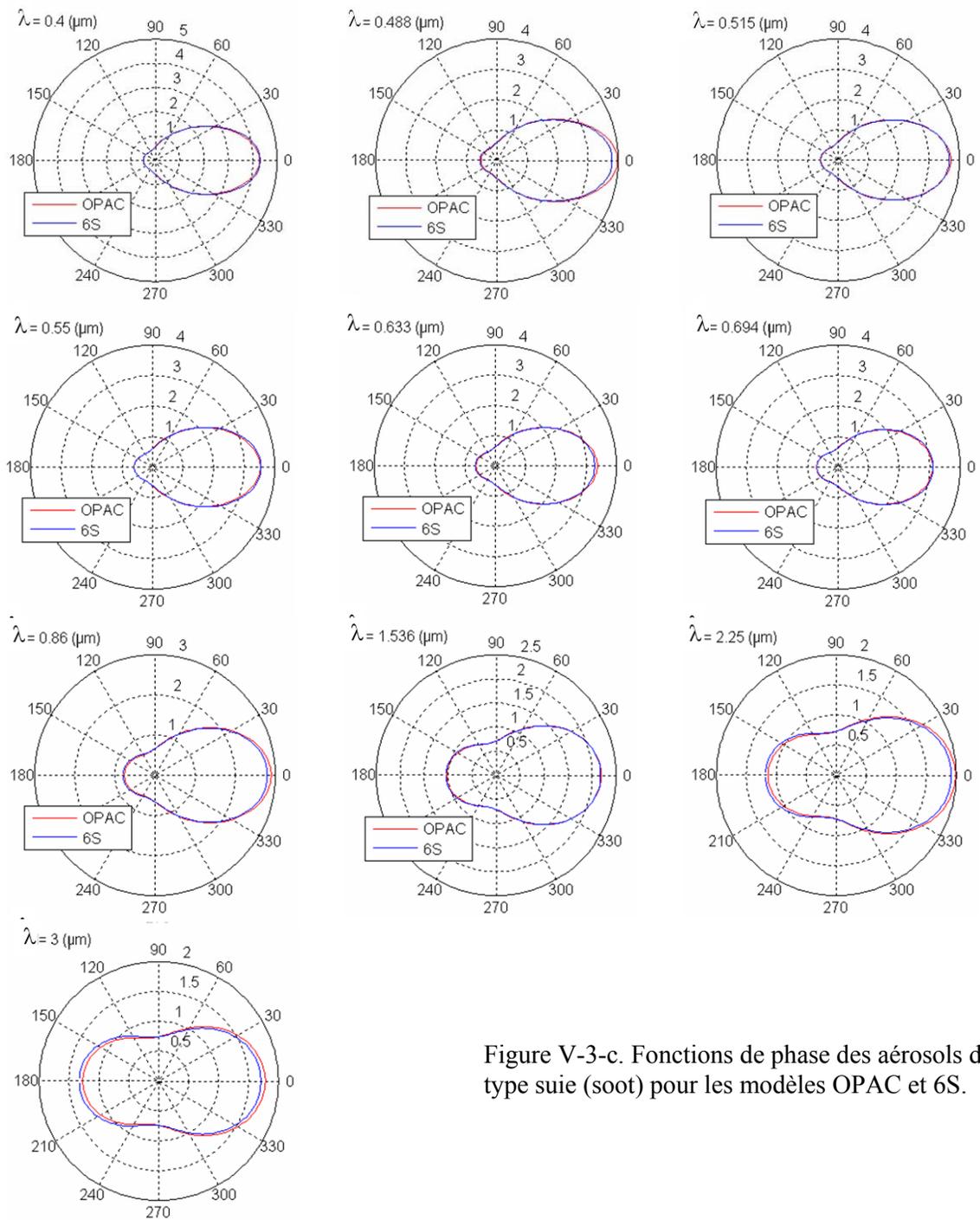


Figure V-3-c. Fonctions de phase des aérosols de type suie (soot) pour les modèles OPAC et 6S.

## V-1-2 Adaptation des paramètres de aérosols de OPAC au code 6S

Les propriétés des aérosols (EX, SC et ASY) du modèle OPAC ne sont pas définies aux mêmes longueurs d'onde que celles du code 6S. Dans OPAC, 61 longueurs d'onde sont utilisées dont 17 se situent entre 0.4 et 3.0  $\mu\text{m}$  (0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.0). Dans le même intervalle, les longueurs d'onde considérées dans le code 6S sont au nombre de 10 (0.4, 0.488, 0.515, 0.55, 0.633, 0.694, 0.86, 1.536, 2.25, 3.0). Il a été alors nécessaire de calculer par interpolation les propriétés des aérosols de OPAC dans les longueurs d'onde de référence du code 6S (figure V-4). Le même problème se pose pour les fonctions de phase : les angles de définition ne sont pas les mêmes. Dans OPAC, 112 angles entre  $-\pi$  et  $\pi$  sont considérés alors le code 6S divise le cercle en 83 angles. Nous avons ainsi choisi parmi les 112 angles de OPAC ceux qui sont les plus proches des 83 angles du 6S et nous avons effectué des interpolations pour les longueurs d'onde (figure V-5 et V-6). Notons que seuls les aérosols de type INSO et WASO ont été intégrés dans le code 6S. L'aérosol « soot » de OPAC est identique à celui du 6S et les autres aérosols du 6S (mineral, SULF et sea salt) ne sont pas compris dans les atmosphères usuelles de type continental et urbain.

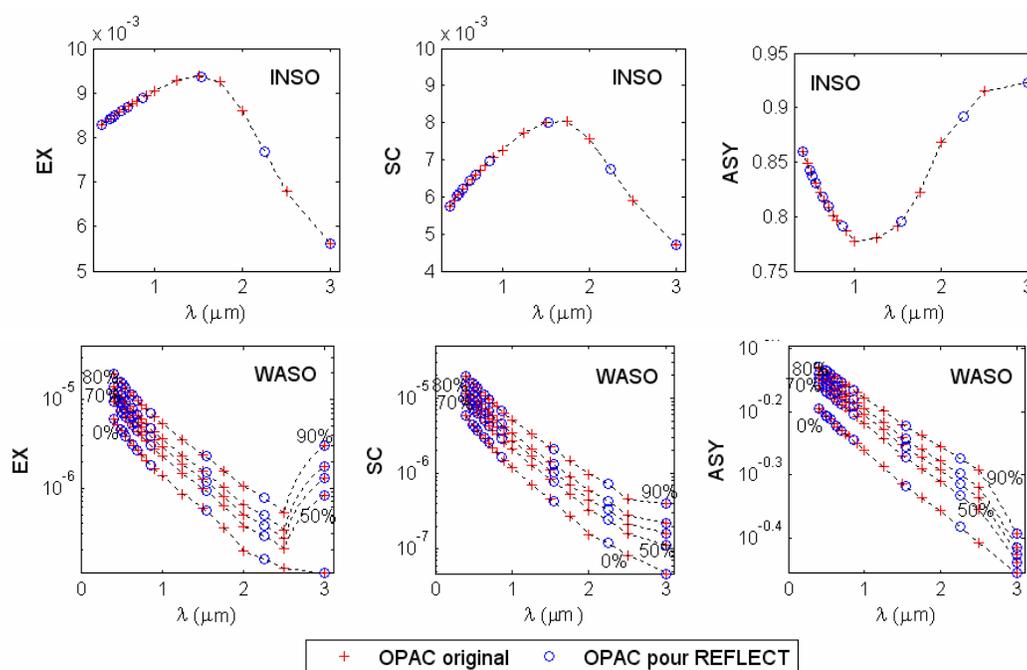


Figure V-4. Interpolation des propriétés (EX, SC et ASY) des aérosols INSO et WASO de OPAC aux longueurs d'onde du code 6S.

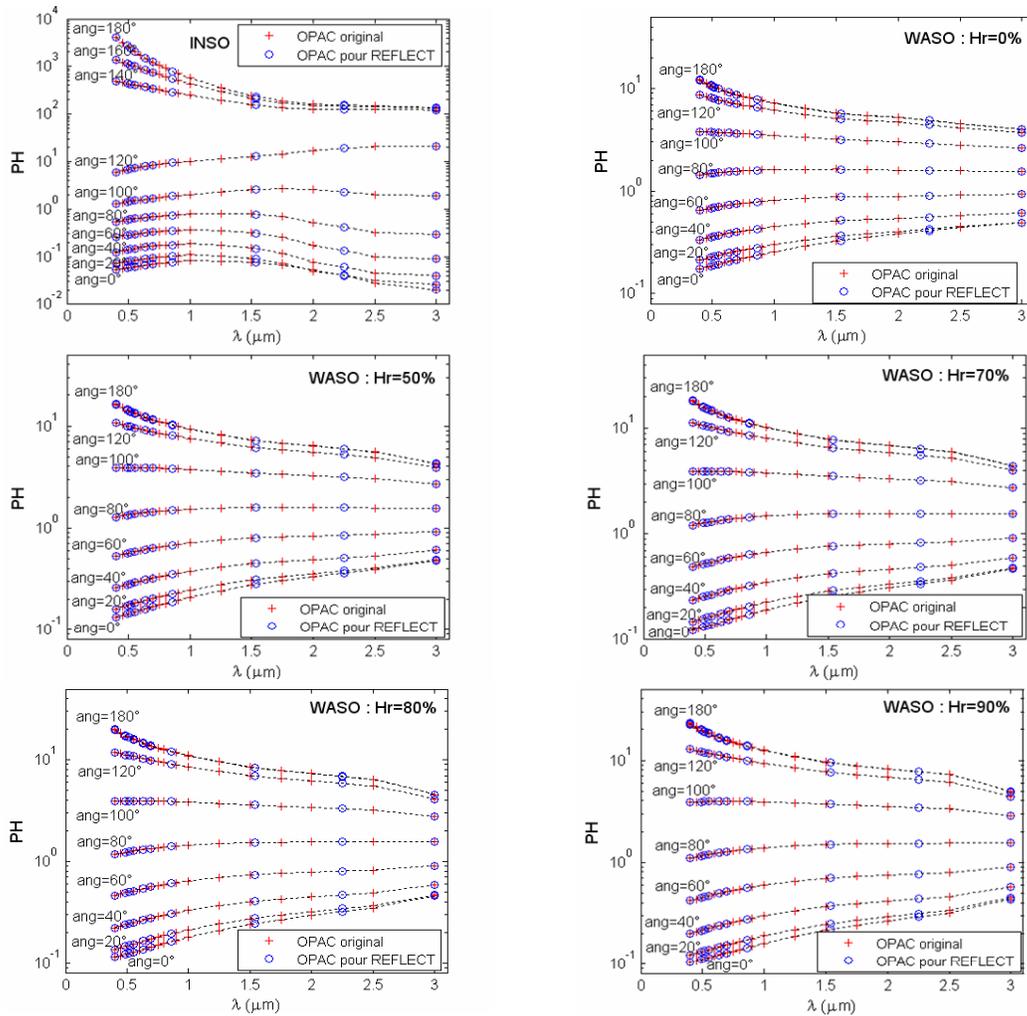


Figure V-5. Interpolation des fonctions de phase (PH) des aérosols INSO et WASO de OPAC aux longueurs d'onde du code 6S. Illustration pour des angles de phase (ang) entre 0 et 180°.

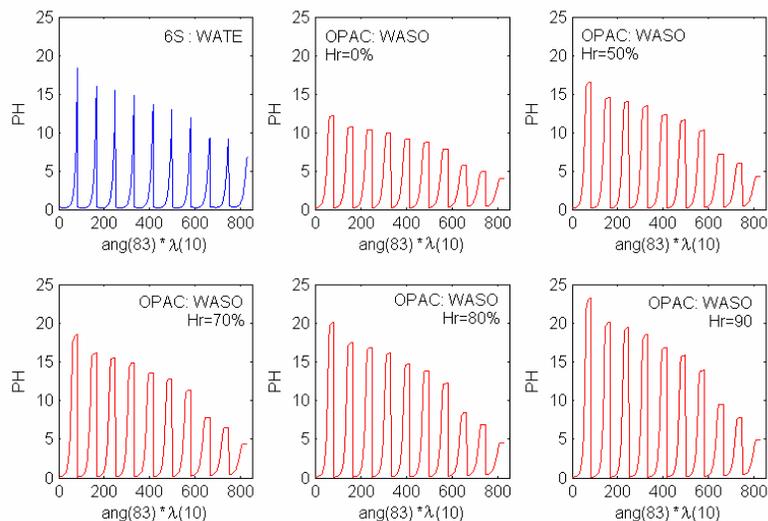


Figure V-6. Fonctions de phase (PH) des aérosols solubles dans l'eau pour OPAC (WASO) et 6S (WATE) pour 83 angles de phase (ang) x 10 longueurs d'onde ( $\lambda$ ).

### V-1-3 Calcul des profils d'humidité relative

L'utilisation de l'aérosol WASO de OPAC nécessite la connaissance de l'humidité relative de l'air dans la couche d'atmosphère où les propriétés de diffusion et d'absorption des aérosols sont calculées. Ainsi, le profil de l'humidité relative est reconstitué en utilisant la formule de Leckner (1978) (équations 14-a et b) rappelée ici :

$$w = 0.493 \frac{H_r P_s}{T_a}$$

où  $w$  est le contenu en vapeur d'eau,  $H_r$  est l'humidité relative (en fraction de 1),  $T_a$  est la température en Kelvin, et  $P_s$  la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air saturé donnée par l'équation semi empirique suivante :

$$P_s = \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T_a}\right)$$

Les profils du contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère  $w$  (g/cm<sup>2</sup>) et celui de la température  $T_a$  sont connus (donnés dans le modèle MIDSUM), le profil de l'humidité relative  $H_r$  est calculé par l'équation :

$$H_r = \frac{w T_a}{0.493 P_s} \quad (15)$$

Le calcul des paramètres des aérosols de type « water soluble » pour les valeurs d'humidité relative calculées à différentes hauteurs est réalisé à l'aide d'une simple interpolation linéaire.

La figure V-7 illustre les profils de pression, température, contenu en vapeur d'eau et d'humidité relative dans une atmosphère de type MIDSUM (*mid-latitude summer*).

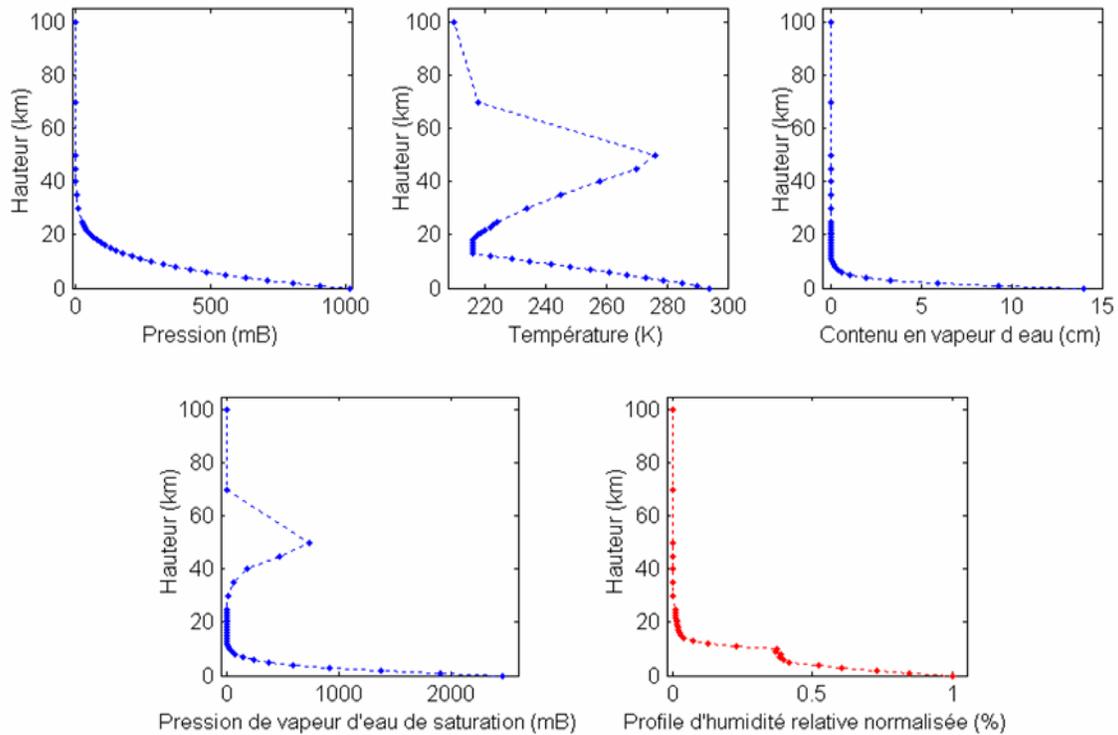


Figure V-7. Profil de pression, température, contenu en vapeur, pression partielle de saturation pour la vapeur d'eau et d'humidité relative pour une atmosphère de type « MIDSUM » (*mid-latitude summer*).

#### V-1-4 Calcul des paramètres atmosphériques pour les aérosols des modèles OPAC et 6S

Les paramètres atmosphériques d'une atmosphère de type « urbain » contenant 56.3% d'aérosols de type « Water Soluble » sont affectés par l'humidité de l'air. Les molécules d'eau gonflent les particules d'aérosols et les propriétés de diffusion ( $t_{diff}^{\downarrow}$ ,  $t_{diff}^{\uparrow}$ ,  $\rho_{atm}$ ,  $S_{alb}$ ) sont plus élevées pour les valeurs plus élevées de l'humidité relative et ce pour la même valeur de l'AOD (tableau V-2).

Tableau V-2. Exemple de calcul des paramètres atmosphériques qui dépendent de l'AOD avec le modèle d'aérosols du code 6S et celui de OPAC pour une atmosphère de type « urbain ». Calculs pour 3valeurs AOD (ciel clair : 0.05, ciel moyen : 0.2 et ciel brumeux : 0.4) et deux valeurs de  $H_r$  (faible :50% et élevée 90%). Les autres paramètres sont fixés à : mois : 06, jour : 30, heure : 15.5 TU,  $H$  : 100 m, lieu : 45°N / 73°O et capteur : ETM+.

		AOD <sub>550</sub> =0.05			AOD <sub>550</sub> =0.2			AOD <sub>550</sub> =0.4		
		6S	OPAC		6S	OPAC		6S	OPAC	
			$H_r=50\%$	$H_r=90\%$		$H_r=50\%$	$H_r=90\%$		$H_r=50\%$	$H_r=90\%$
Bande bleue	$t_{dir}^{\downarrow}$	0.7270	0.6936	0.7988	0.5109	0.7729	0.7638	0.3193	0.7339	0.7236
	$t_{diff}^{\downarrow}$	0.1222	0.1440	0.0737	0.2485	0.0914	0.0976	0.3181	0.1177	0.1245
	$t_{dir}^{\uparrow}$	0.7545	0.7238	0.8199	0.5525	0.7964	0.7882	0.3647	0.7608	0.7514
	$t_{diff}^{\uparrow}$	0.1123	0.1329	0.0671	0.2358	0.0835	0.0892	0.3140	0.1080	0.1145
	$\rho_{atm}$	0.0727	0.0752	0.0685	0.0837	0.0708	0.0715	0.1182	0.0722	0.0729
Bande verte	$t_{dir}^{\downarrow}$	0.8099	0.7763	0.8815	0.5894	0.8558	0.8467	0.3859	0.8168	0.8065
	$t_{diff}^{\downarrow}$	0.1082	0.1325	0.0548	0.2543	0.0742	0.0810	0.3507	0.1032	0.1107
	$t_{dir}^{\uparrow}$	0.8300	0.7995	0.8946	0.6268	0.8714	0.8633	0.4311	0.8363	0.8269
	$t_{diff}^{\uparrow}$	0.0982	0.1208	0.0493	0.2375	0.0670	0.0732	0.3389	0.0936	0.1006
	$\rho_{atm}$	0.0398	0.0418	0.0353	0.0511	0.0370	0.0375	0.0736	0.0393	0.0400
Bande rouge	$t_{dir}^{\downarrow}$	0.8678	0.8376	0.9316	0.6653	0.9088	0.9007	0.4668	0.8740	0.8648
	$t_{diff}^{\downarrow}$	0.0861	0.1091	0.0362	0.2299	0.0543	0.0606	0.3398	0.0813	0.0884
	$t_{dir}^{\uparrow}$	0.8823	0.8551	0.9393	0.6977	0.9190	0.9118	0.5102	0.8878	0.8795
	$t_{diff}^{\uparrow}$	0.0776	0.0986	0.0324	0.2122	0.0486	0.0543	0.3229	0.0732	0.0797
	$\rho_{atm}$	0.0214	0.0230	0.0180	0.0318	0.0193	0.0198	0.0451	0.0211	0.0216
Bande PIR	$t_{dir}^{\downarrow}$	0.9141	0.8894	0.9657	0.7442	0.9473	0.9408	0.5659	0.9192	0.9116
	$t_{diff}^{\downarrow}$	0.0613	0.0807	0.0199	0.1877	0.0348	0.0400	0.3017	0.0573	0.0633
	$t_{dir}^{\uparrow}$	0.9238	0.9016	0.9696	0.7703	0.9533	0.9476	0.6047	0.9282	0.9215
	$t_{diff}^{\uparrow}$	0.0549	0.0725	0.0177	0.1714	0.0311	0.0357	0.2819	0.0513	0.0567
	$\rho_{atm}$	0.0099	0.0110	0.0076	0.0181	0.0084	0.0087	0.0250	0.0097	0.0100

## **V-2 Connaissance de l'épaisseur optique**

### **V-2-1 Les sources des données : généralités**

Yu *et al.* (2006) ont réalisé un travail de fond pour recenser et expliquer les méthodes de mesure et de caractérisation des aérosols et les incertitudes liées à ces méthodes. Les auteurs citent trois approches : (1) Les campagnes intensives de mesures *in situ* (2) les réseaux terrestres (ex. AERONET) et (3) les estimations indirectes par des données de télédétection. Une autre source de données dont ces auteurs ne font pas mention est la visibilité mesurée par les stations météorologiques sur une base routinière.

#### **a- Les campagnes de mesure**

Ces campagnes permettent de caractériser de la manière la plus complète possible les propriétés physiques, chimiques et optiques ainsi que les effets radiatifs des aérosols. Les mesures se font à l'aide de photoradiomètres solaires par la mesure de l'irradiation spectrale directe (Vermeulen *et al.* 2000; Dubovik et King, 2000; 'Microtops User Guide'). Ces radiomètres étant très coûteux, les mesures régulières de l'AOD sont limitées à un certain nombre de stations à travers le monde.

#### **b- Les réseaux terrestres**

Parmi ces réseaux, le plus important est le réseau AERONET initié par la NASA. Il inclut plus de 200 stations terrestres qui effectuent des mesures radiométriques spectrales permettant de retrouver les propriétés les plus importantes des aérosols (albédo de simple diffusion, distribution selon la taille, fonction de phase, facteur d'asymétrie, AOD). Ces mesures sont effectuées sur une base routinière et depuis plus de dix ans pour certaines stations. L'AOD est estimée à différentes longueurs d'onde (440, 670, 870 et 1020 nm) à l'aide de photomètres ou de radiomètres bien calibrés (Holben *et al.* 1998). L'AOD issu de AREONET a fait l'objet de plusieurs travaux pour analyser la distribution des aérosols sur des échelles spatiales et/ou temporelles (Dubovik *et al.* 2000; Bokoye *et al.* 2001; Dubovik *et al.* 2002; O'Neill *et al.* 2002). Le réseau canadien AEROCAN (AEROSol CANada) compte huit stations de mesure (et une dizaine d'autres en cours de réalisation) et fait partie du réseau AERONET

(<http://www.pages.usherbrooke.ca/aerocan>). Un autre réseau, plus local, du nom de IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) sert à l'estimation de l'AOD aux États Unis à partir de mesures de visibilité. En Europe, le réseau EARLINET (The European Aerosol Research Lidar Network) a été établi en 2000 afin de caractériser les distributions horizontale, verticale et temporelle des aérosols à une échelle continentale. Un réseau similaire (The Asian Dust Network ou AD-Net) existe également pour l'Asie.

Le problème qui se pose avec ces réseaux de mesure est la résolution spatiale insuffisante pour les applications que nous visons, c'est à dire une résolution de 5 à 30 mètres correspondant aux images satellitaires de haute et très haute résolution.

### **c- Les estimations indirectes**

Des mesures globales de l'AOD sont réalisées à partir d'observations satellitaires au dessus de cibles obscures de réflectances faibles et invariantes (Yu *et al.* 2006). L'approche satellitaire est très appréciée car elle permet de suivre la grande variabilité spatiale et temporelle de ce paramètre. Ainsi, le capteur AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer) fournit, sur les océans, des estimations d'AOD dans les bandes visibles et proche infrarouge avec une résolution proche du km (Soufflet *et al.* 1997; Ignatov et Stowe, 2002-a et b ; Holben *et al.* 1992; Schmechtig *et al.* 2003). Le capteur français POLDER (Polarisation and Directionality of the Earth Reflectance) monté sur le satellite japonais ADEOS (ADvanced Earth Observing Satellite) est également utilisé pour mesurer des données sur les aérosols au dessus des océans et des continents également avec une résolution d'environ 6 km. Toutefois, POLDER est incapable de réaliser des mesures précises pour les aérosols qui ne polarisent pas la lumière tels que les particules de type poussières (Kaufman *et al.* 1997 et 2005). Depuis 2000, le capteur MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) monté sur les deux satellites Terra et Aqua de la NASA sert à la déduction de l'AOD sur les océans et sur « des portions du sol » à une échelle globale et avec une répétitivité quotidienne et pour sept bandes multispectrales entre 0.47 et 2.13  $\mu\text{m}$ . Une des forces de MODIS est qu'il offre une bande bleue pour laquelle les réflectances au sol sont faibles et la diffusion par les aérosols est élevée (Chu *et al.* 2002 ; Kaufman *et al.* 2002 ; Hsu *et al.* 2004; Costa *et al.* 2004; Kaufman et Tanré, 1998; Vermote *et al.* 2002). La précision est de l'ordre de  $\pm 0.05 \pm 0.2\tau$  et les écarts par rapport à AERONET sont d'environ 20% sur des moyennes mensuelles (Remer *et al.* 2005; Tripathi *et al.* 2005). L'accès au site se fait à travers <http://modis.gsfc.nasa.gov>. Finalement,

des données provenant du capteur MISR (Multi-angle Imaging Spectroradiometer) permettant également d'atteindre une précision de 20% pour les estimations de l'AOD. L'approche des estimations satellitaires offre une meilleure couverture spatiale par rapport à la densité des réseaux terrestres, mais reste limitée précision et en fréquence temporelle.

#### **d- Les mesures de visibilité**

L'estimation de l'AOD à 550 nm à partir de la visibilité est très approximative. Généralement, des modèles simples sont proposés dans la littérature (So *et al.* 2005; Qiu, 2003). Les données de visibilité ne sont pas des mesures précises, ce sont plutôt des ordres de grandeurs (du type 5 km, 15 km, 23 km,...) acquises au niveau des aéroports pour l'aviation. Pour ces raisons, cette voie d'estimation de l'AOD n'est pas très recommandée.

#### **V-2-2 Les implications pour notre recherche**

Nous avons procédé à une série de mesures *in situ* pour examiner la possibilité d'utiliser les données provenant des stations du réseau AERONET (AEROCAN puisque les sites d'intérêt sont situés au Canada) ou des données sur la visibilité dans les zones à l'étude qui se situent dans la majorité des cas dans la grande région Métropolitaine de Montréal (chapitre II).

L'appareil utilisé pour les mesures *in situ* était le Microtops II sunphotometer (SOLAR Light co.). La mesure nécessite des intrants qui permettent de calculer l'irradiation solaire hors atmosphère (latitude, longitude, date, heure en temps solaire vrai ou TSV) ainsi que des données permettant d'estimer l'atténuation due aux gaz (altitude, température ambiante, pression atmosphérique). Les mesures Microtops d'AOD sont décrites dans le chapitre II (section II-3). Les données du réseau AERONET ont été récupérées pour la station la plus proche, c'est-à-dire celle du CARTEL située à l'Université de Sherbrooke, Québec (45.38° N, 71.93° O), située à plus de 100 km de la région principale des mesure par Microtops (St-Jean-sur-Richelieu). Lorsque les données ne sont pas disponibles pour le CARTEL, nous recherchons la station la plus proche (souvent à plusieurs centaines de km du lieu de mesure par Microtops), les stations considérées sont Halifax (44.63° N, 63.59° O) ou Egbert (44.22° N, 79.75° O). Les données de visibilité ont été récupérées sur le site Internet d'Environnement Canada pour les stations météorologiques de St-Hubert, de l'aéroport Pierre-Elliott-Trudeau (si la donnée de St-Hubert n'est pas disponible).

L'estimation de l'AOD à partir de la visibilité a été réalisée au moyen d'une formule empirique simple (équation 16, figure V-8) donnant des valeurs intermédiaires entre le modèle de So *et al.* (2005) et celui de Qiu (2003).

$$AOD_{550,VIS} = 3 / (VIS - 3) \quad (16)$$

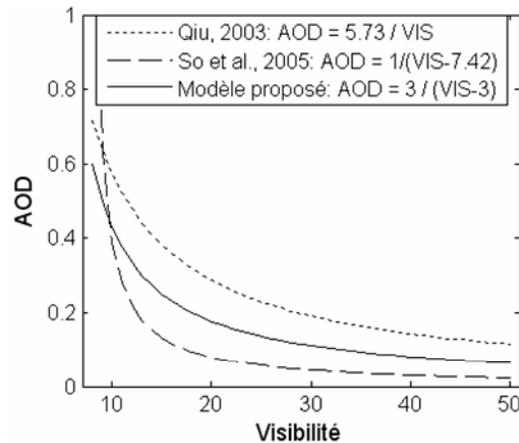


Figure V-8. Modèles de prédiction de l'AOD en fonction de la visibilité.

Les données n'étaient pas disponibles pour toutes les dates d'intérêt dans le site Internet du réseau AERONET. Même pour les dates où des données sont disponibles, les stations de mesures sont très éloignées des lieux où nous avons réalisé les mesures. Les données d'AOD issues du capteur MODIS sont fournies à une échelle quotidienne pour une grille latitude/longitude de 1° (Remer *et al.* 2005), ce qui correspond à une résolution spatiale d'environ 111 km. Cette dernière ne convient pas à la correction de la variabilité spatiale de l'AOD dans une image HR ou VHR (pixels de 30 m ou moins). Le problème se pose également pour la visibilité qui n'est pas mesurée par toutes les stations du réseau météorologique (notamment celui d'Environnement Canada). De plus, là où elles sont disponibles, les données sont trop approximatives. À titre d'exemple, la station St-Hubert donne la valeur 15 km pour toutes les dates que nous avons cherchées.

Le tableau V-3 montre que les données issues du réseau AERONET (quand elles sont disponibles) sont assez proches des mesures Microtops lorsque la station de AERONET utilisée (CARTEL) est proche des sites de mesure. L'AOD estimé à partir de la visibilité ( $AOD_{550,VIS}$ ) donne juste un ordre de grandeur qui est souvent loin des valeurs mesurées.

Compte tenu de l'état des choses sur les sources de données de l'AOD, la méthode d'estimation que nous avons privilégiée est celle des cibles obscures appliquées aux images analysées. La façon de faire est expliquée en détail dans le chapitre VI.

Tableau V-3. Comparaison des valeurs d'AOD mesuré (par Microtops) avec celles estimées à partir de la visibilité ( $AOD_{550,VIS}$ ) et celles données par le réseau AERONET.

Lieu, date et heure locale	AOD <sub>550</sub> mesuré (Microtops)	Visibilité et AOD <sub>550</sub> estimé		AOD <sub>550</sub> AERONET
		VIS (km) et site	AOD <sub>550,VIS</sub>	
CRDH, 22-06-2005 14h30	0.074	15 (St-Hubert)	0.25	0.05 (CARTEL)
CRDH, 27-06-2005 14h00	0.11	15 (St-Hubert)	0.25	Aucune mesure
CRDH, 11-07-2005 8h30	0.36	15 (St-Hubert)	0.25	0.3 (CARTEL)
St Valentin, 11-07-2005 10h30	0.38	14.5 (St-Hubert)	0.26	0.3 (CARTEL)
St Valentin, 11-07-2005 11h30	0.35	15 (St-Hubert)	0.25	0.3 (CARTEL)
St Valentin, 20-07-2006 11h	0.28	15 (St-Hubert)	0.25	0.13 (Halifax)
CRDH, 15-06-2007 12h	0.15	15 (St-Hubert)	0.25	0.1 (CARTEL)
CRDH, 18-06-2007 14h30	1.11 (nuages)	12 (St-Hubert)	0.33	Aucune mesure
St Valentin, 29-06-2007 9h45	0.1	15 (St-Hubert)	0.25	0.09 (Halifax)
St Valentin, 10-07-2007 10h	0.55	15 (St-Hubert)	0.25	0.5 (CARTEL)
Montréal, 01-08-2007 15h	0.48	24.1 (P.E. Trud.)	0.14	Aucune mesure
Tremblant 05-08-2007 16h40	0.07	-	0.25	Aucune mesure
Tremblant 05-08-2007 17h45	0.08	-	0.25	Aucune mesure
CRDH, 28-08-2007 13h	0.08	15 (St-Hubert)	0.25	0.16 (Egbert)
Montréal, 02-09-2007 14h	0.1	48.3 (P.E. Trud.)	0.066	0.18 (CARTEL)
CRDH, 04-09-2007 15h	0.066	15 (St-Hubert)	0.25	Aucune mesure
CRDH 25-09-2007 13h30	0.43	15 (St-Hubert)	0.25	Aucune mesure
CRDH, 22-10-2007 13h30	0.063	15 (St-Hubert)	0.25	Aucune mesure

### V-3 Modèle d'extrapolation de l'AOD en fonction de la longueur d'onde

La loi d'extrapolation de l'AOD à 550 nm aux autres longueurs d'onde utilisée dans le code 6S est donnée par l'équation 10 rappelée ci-dessous :

$$AOD(\lambda) = AOD_{550} \left( \frac{\lambda[nm]}{550nm} \right)^{-a}$$

Dans des travaux précédents de notre laboratoire (Cavayas *et al.* 2003; Bouroubi *et al.* 2005), nous avons obtenu, avec la première version de REFLECT appliquée à des cultures agricoles sur des images Landsat-7 ETM+ de la Montérégie, Québec, une bonne estimation de la

réflectance au sol dans la bande verte (550 nm) alors que les réflectances dans la bande rouge étaient surestimées et les réflectances dans la bande PIR étaient sous-estimées. Nous avons pensé qu'une des causes possibles à cela était une loi de puissance mal adaptée au territoire d'étude (la Montérégie). Dans notre cas, il y aurait possiblement une tendance d'une dominance de particules de petite taille (coefficient supérieur à 2). L'étude de cette question nous a mené à proposer une autre loi d'extrapolation que celle utilisée dans le 6S.

Pour ce faire, nous avons utilisées des mesures d'AOD *in situ* à l'aide du radiomètre Microtops (Microtops II sunphotometer, SOLAR Light co.). Les mesures ont été réalisées essentiellement en milieu rural (Montérégie, Québec) durant les étés 2005 à 2007. Nous avons également réalisé quelques mesures en milieu urbain (Montréal, Québec) et forestier (Mont Tremblant, Laurentides, Québec). Plus de détails sur ces mesures sont données par le tableau II-2. Nous avons trouvé que le type de site (rural ou urbain) n'influe pas sur la relation entre l'AOD et la longueur d'onde. Sur la figure V-9, le rapport entre l'AOD mesuré à des longueurs d'onde de 380, 870, 936, 1020 nm et celui mesuré à 550 nm ne montre pas de différence systématique selon le milieu. Nous pouvons voir sur la même figure que la loi de puissance utilisée dans le code 6S (équation 10) ne peut pas suivre les mesures d'AOD. Pour  $a=1$ , la loi convient pour des faibles longueurs d'onde (autour de 400 nm) mais pas pour les longueurs d'ondes élevées (800 nm et plus). Inversement, si l'on prend  $a=3$ , la courbe s'approche des mesures pour les longueurs d'ondes élevées mais s'en éloigne pour les faibles longueurs d'onde.

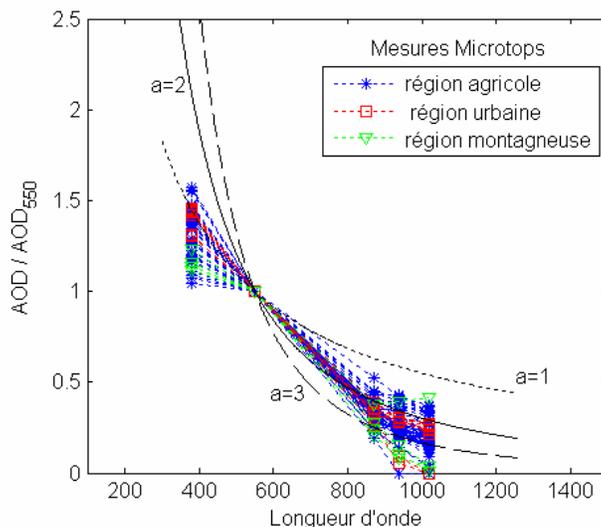


Figure V-9. Comparaison des mesures spectrales de l'AOD rapporté à sa valeur à 550 nm selon le type de région avec le modèle utilisé dans le code 6S (équation 10) avec  $a=1, 2$  et 3.

Nous proposons ainsi une fonction gaussienne qui respecte le principe physique de la normalité des phénomènes et les conditions aux limites de la relation, du moins dans la gamme de longueurs d'ondes utilisées. Cette fonction est donnée par l'équation 17. La figure V-10 montre que le modèle proposé se confond bien avec la moyenne des mesures pour les cinq longueurs d'ondes offertes par le radiomètre Microtops utilisé.

$$AOD(\lambda) = K_1 AOD_{550} \exp\left(-K_2 \left(\frac{\lambda}{550}\right)^2\right) \quad (17)$$

Les valeurs des coefficients sont  $K_1 = 1.91$  et  $K_2 = 0.65$ .

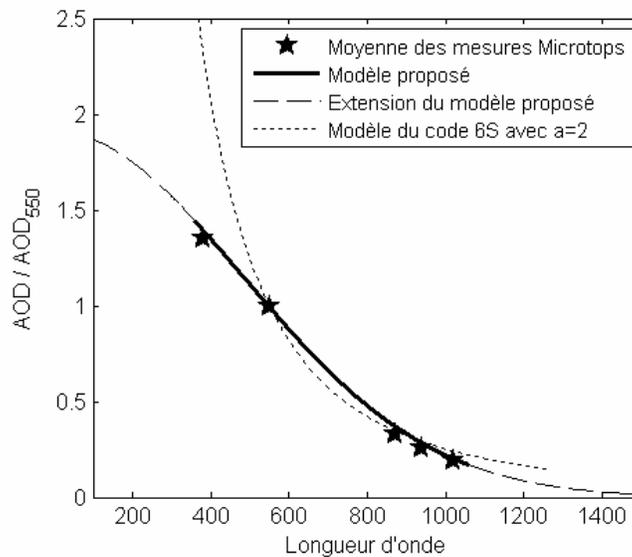


Figure V-10. Comparaison des moyennes des mesures spectrales de l'AOD, rapportées à leur valeur à 550 nm, avec le modèle du code 6S ( $a=1$ ) et modèle proposé (équation 17).

# CHAPITRE VI - Estimation de l'AOD par la méthode des cibles obscures

## VI-1 Introduction

Nous avons vu dans le premier chapitre que plusieurs auteurs utilisent les cibles obscures pour l'estimation de l'épaisseur optique notamment par un processus itératif sur la valeur de l'AOD (Teillet et Fedosejevs, 1995). King *et al.* (1999) présentent une revue des techniques d'estimation des propriétés des aérosols à partir de divers capteurs satellitaires et les avantages et inconvénients de chaque capteur pour cette application. Ils concluent qu'il serait très difficile de tenter d'évaluer des propriétés comme la distribution de la taille des aérosols ou l'albédo de simple diffusion mais que l'épaisseur optique pouvait être correctement estimée à partir des cibles obscures. Schmechting *et al.* (2003) utilisent la végétation dense et le code 6S pour l'estimation de l'AOD à partir des images de l'instrument Envisat-MERIS. Les auteurs montrent, à travers un bilan des erreurs, que les sources d'erreurs les plus importantes sont les changements de calibration de l'instrument, le modèle d'aérosol adopté et les changements dans la climatologie des aérosols et surtout le choix des cibles obscures qu'ils ont sélectionnées à partir d'un seuil de ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index). Moran *et al.* (1992) avaient également trouvé que la fiabilité de l'estimation de l'AOD à partir de l'image dépend fortement du choix des cibles obscures.

Dans notre cas, la réalisation d'un programme informatique qui déduit l'AOD des cibles obscures nécessite trois opérations de base :

1. La localisation de ces cibles dans une image
2. L'application du code atmosphérique par cible obscure
3. La généralisation des résultats de l'étape 2 à l'ensemble de l'image.

Ces trois points seront examinés par la suite et nous concluons ce chapitre avec une analyse comparative entre la méthode de cibles obscures proposée ici et des mesures du réseau AERONET ou des estimations obtenues à partir des données de visibilité.

## VI-2 Localisation

Les cibles obscures sont des pixels caractérisés par : (1) une très faible réflectance connue dans une ou plusieurs bandes spectrales dans la partie du visible, et (2) une réflectance stable pendant la saison d'acquisition des images. Deux types de surfaces répondant très bien à la définition des cibles obscures, les masses d'eau claire et profonde et la forêt très dense qui réfléchit très peu dans les bandes spectrales bleue et rouge. Différentes méthodes ont été proposées pour localiser les cibles obscures en employant les bandes disponibles d'une image multispectrale. Ces méthodes font appel pour la plupart au seuillage de l'histogramme des bandes spectrales utilisées. Voici les principales méthodes suggérées dans la littérature.

Pour des cibles obscures de type eau claire et profonde, Ahern *et al.* (1979) utilisent un seuillage d'histogramme interactif pour les bandes disponibles dans le PIR et le visible. Le principe est d'isoler les pixels d'eau par seuillage de l'histogramme PIR (valeurs les plus basses) puis choisir parmi les pixels d'eau ceux d'eau claire et qui sont obscurs dans le visible et ce par seuillage de l'histogramme des bandes visibles disponibles. Cette méthode garantit la localisation des pixels d'eau qui approchent le plus la définition de l'eau claire et profonde.

Pour détection de la forêt dense, Kaufman et Sendra (1988) offrent à l'utilisateur d'introduire des valeurs des seuils de NDVI (fort) et de choisir parmi eux ceux avec la plus faible valeur dans le PIR. Kaufman et Tanré (1996) proposent d'appliquer un seuillage des bandes disponibles dans le moyen infrarouge ( $\lambda > 2.2\mu\text{m}$ ) puis de définir les cibles obscures dans le visible. Cette approche ne s'applique cependant que pour les capteurs disposant de la bande moyen-infrarouge. Richter (1996-a) suggère pour la recherche des pixels de forêt l'introduction par l'utilisateur des valeurs des seuils de  $RVI = PIR/Rouge$  ainsi que de la bande PIR. Pour l'eau, les pixels sont isolés avec un RVI inférieur à un seuil et un PIR faible. Cette méthode permet cependant à tout pixel d'eau turbide d'être retenu. En effet plus l'eau est turbide plus sa réflectance augmente dans le rouge tandis qu'elle demeure pratiquement constante dans le PIR. Cette méthode nécessite beaucoup de travail interactif pour fixer des seuils appropriés permettant d'isoler les pixels d'eau claire. Teillet et Fedosejevs (1995) recommandent, pour l'eau et la forêt, de choisir par bande spectrale disponible dans le visible comme cibles obscures les pixels ayant la valeur la plus basse possible avec une fréquence d'occurrence plus grande ou égale à un seuil. Pour une scène Landsat-7 complète, les auteurs

suggèrent comme seuil la fréquence de 1000 pixels. Cette approche ne faisant pas appel au PIR ne garantit pas dans tous les cas la localisation des pixels d'eau et a tendance à choisir des pixels dans l'ombre des nuages (Cavayas, 2003).

### **Méthode développée pour REFLECT**

Un pixel correspondant à une cible obscure doit avoir une très faible réflectance dans une ou plusieurs bandes spectrales dans la partie du visible. Comme indiqué ci-haut, il est d'usage d'utiliser deux types d'objets répondant très bien à la définition des cibles obscures : les masses d'eau claire et profonde, et la forêt très dense, obscure dans les bandes bleue et rouge du spectre. Les méthodes de localisation des cibles obscures sont basées sur un seuillage automatique (plus une option semi-automatique) de l'histogramme des différentes bandes spectrales.

- Pixels d'eau claire et profonde : l'utilisation du PIR permet de distinguer l'eau de la terre et, en choisissant parmi les pixels d'eau ceux ayant les valeurs les plus basses dans les bandes du visible disponibles, nous évitons les pixels d'eau turbide ou peu profonde. Les seuils dans le PIR et dans les bandes du visible (bleue, verte et rouge, si disponibles) sont définis respectivement comme le premier minimum local ( $MIN_{PIR}$ ) et les premiers modes locaux ( $MOD_{bleu}$ ,  $MOD_{vert}$  et  $MOD_{rouge}$ ) des histogrammes des valeurs numériques. Chaque pixel de l'image qui satisfait la relation suivante est retenu comme pixel d'eau claire (figure VI-1) :

$$(0 < VN_{PIR} < MIN_{PIR}) \& (0 < VN_{bleu} \leq MOD_{bleu}) \& (0 < VN_{vert} \leq MOD_{vert}) \& (0 < VN_{rouge} \leq MOD_{rouge})$$

Toutefois, pour une image contaminée par les nuages, et afin d'éviter de prendre les pixels dans les ombres des nuages, une condition plus stricte peut être imposée dans le PIR. Il faut définir un seuil plus bas que  $MIN_{PIR}$ , par exemple le premier mode de l'histogramme  $MOD_{PIR}$ .

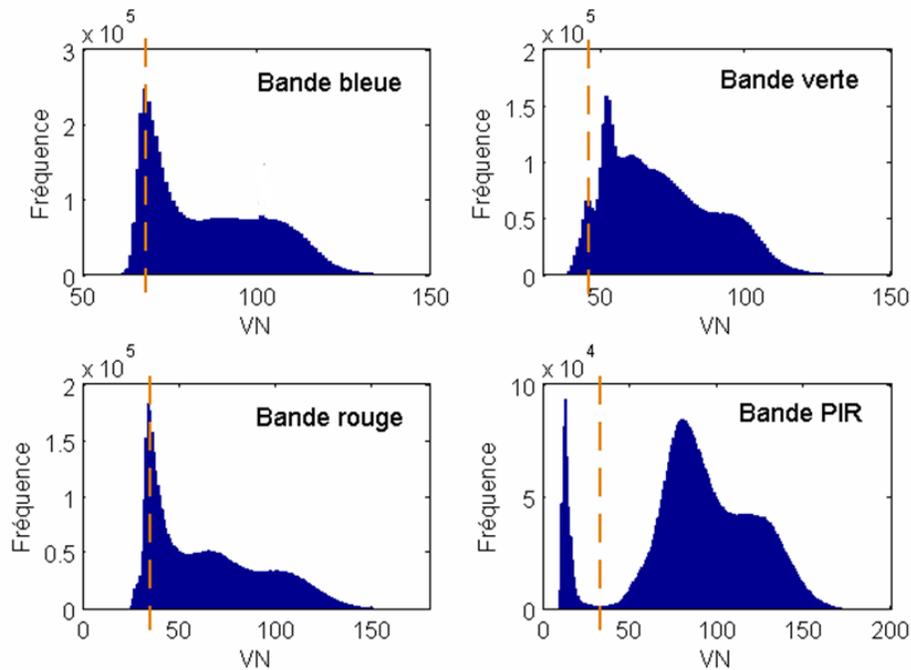


Figure VI-1. Seuillage des histogrammes des bandes bleue, verte, rouge et PIR (image ETM+ du 08-06-2001) pour la détection des cibles obscures de type eau claire et profonde.

- Pixels de forêt dense : la relation rouge-infrarouge est employée pour différencier la végétation des sols à nu ou des surfaces d'eau (figure VI-2). Parmi ces pixels, seuls ceux qui ont une réflectance appropriée dans la bande rouge sont gardés. Ainsi, pour qu'un pixel soit retenu comme forêt dense, il doit avoir des valeurs numériques respectant trois seuils :

$$(VN_{PIR} - VN_{ROUGE} > S_1) \& (S_2 \leq VN_{ROUGE} < S_3)$$

Pour définir le seuil  $S_1$ , les valeurs numériques des pixels ayant une réflectance de 0.02 dans le rouge et 0.15 dans le PIR sont simulées tenant compte des conditions de prise de l'image à l'étude ainsi que de la présence d'une atmosphère relativement claire (épaisseur optique des aérosols de 0.05). Les paramètres atmosphériques correspondants sont calculés par le code 6S. Le seuil  $S_3$  est le mode de l'histogramme de la bande rouge calculé à partir des pixels qui satisfont le premier critère. Quant au seuil  $S_2$ , il a été ajouté pour éviter le plus possible les pixels limitrophes des lacs ainsi que le pourtour des zones ombragées par les nuages. Il a été fixé à  $S_2 = S_3 - 3$ .

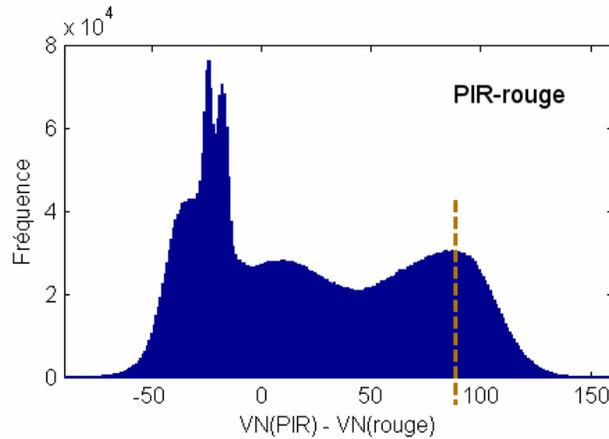


Figure VI-2. Seuillage d’histogramme des différences de VN des bandes PIR et rouge (image ETM+ du 08-06-2001) pour la détection des cibles obscures de type forêt dense.

Afin de donner plus de possibilités à l’utilisateur quant au choix des seuils d’acceptation des cibles obscures, nous avons rajouté à l’algorithme une option de choix manuel du « degré de sévérité » des conditions d’obscurité des cibles (voir l’interface graphique, section IV-2-3). Dans l’option semi-automatique de recherche des pixels d’eau claire et profonde, les seuils hauts (Seuil<sub>PIR</sub> et Seuil<sub>VIS</sub>) sont calculés à partir d’un degré de sévérité  $DS$ , compris entre 0 et 1, tel qu’indiqué dans les équations 18 et 19.

$$\text{Seuil}_{\text{PIR}} = DS (MOD_{\text{PIR}}-2) + (1-DS) (MIN_{\text{PIR}}+2) \quad (18)$$

$$\text{Seuil}_{\text{VIS}} = DS (MOD_{\text{VIS}}-2) + (1-DS) (MOD_{\text{VIS}}+6) \quad (19)$$

Pour la forêt, le seuil  $S_1$  correspondant à la différence des valeurs numériques entre le PIR et le rouge devient :

$$S_1^* = 0.8 + (DS/2) * S_1 \quad (20)$$

Par ailleurs, une autre amélioration a été apportée à la recherche des cibles obscures : dans les cas d’images hétérogènes en terme de distribution spatiale de l’AOD, la technique du seuillage d’histogrammes ne retient que les cibles obscures se trouvant dans les parties de l’image où l’atmosphère est la plus claire. Ainsi, l’algorithme « Mask » permet de diviser la scène en  $N \times M$  sous-images et de réaliser la recherche dans chacune d’elles. Grâce à cette recherche locale, la variation spatiale de l’AOD peut être suivie et corrigée par la suite après le calcul (par interpolation ou par ajustement) de l’AOD pour tous les pixels de l’image. Notons que Ouaidrari et Vermote (1999) ont également proposé de diviser l’image en  $4 \times 4$  cadrans pour rechercher les cibles obscures dans une image avec une atmosphère non homogène. Ahern *et al.* (1979) et Teillet *et al.* (1987) ont également abordé cette question.

Les figures VI-3 et VI-4 illustrent respectivement des images Landsat-7 ETM+ et Landsat-5 TM ainsi que le résultat de recherche des cibles obscures de type eau claire et profonde et forêt dense, avec l'option du choix automatique des seuils, pour l'ensemble de l'image dans un cas et pour une subdivisions de 2x2 dans l'autre. Les résultats montrent que :

- dans les zones brumeuses ou couvertes par des cirrus, les cibles obscures ne sont pas détectés sans division d'image (images ETM+ du 20-05-2000 et 05-06-2000 et image TM du 18-06-1996), une subdivision 2x2 atténue le problème,
- dans le cas de l'existence d'un voile de cirrus dans la scène, une subdivision 2x2 ne suffit parfois pas pour trouver des cibles obscures dans les régions couvertes (images ETM+ 05-06-2000 et TM du 18-06-1996),
- dans le cas du choix automatique des seuils, les ombres de nuages sont détectés comme pixels d'eau claire et profonde (images ETM+ 26-07-2001 et TM 25-07-1992),
- lorsqu'on effectue une recherche localisée (subdivision de l'image), il est possible de détecter, avec un choix automatique des seuils, des cibles obscures de type eau claire et profonde qui ne le sont pas (images ETM+ 20-05-2000 et ETM+ 08-06-2001), un choix manuel des seuils s'impose,
- toujours dans le cas de la recherche localisée, il est également possible de détecter un nombre excessif de pixels de forêt dense (TM 25-07-1992 et TM 27-08-1998), les seuils devront être plus sévères, dans ces cas et l'option semi-automatique est recommandée.

Concernant le dernier constat, nous pouvons voir sur la figure VI-5 qu'un choix manuel du degré de sévérité à 70%, pour lequel les seuils  $Seuil_{PIR}$  et  $Seuil_{VIS}$  sont plus bas par rapport à l'option complètement automatique, permet d'éliminer les faux pixels d'eau claire et profonde détectés sur les images ETM+ du 20-05-2000 et du 08-06-2001. La figure VI-6 montre également que les pixels de forêt dense détectés sur les images TM du 25-07-1992 et du 27-08-1998 sont moins nombreux notamment dans la partie Sud-est de la scène.

Ainsi, il est toujours recommandé de visualiser le masque des cibles obscures généré par le programme « Mask » avant de l'utiliser. Il serait nécessaire dans les cas d'hétérogénéité de la distribution spatiale de l'AOD de subdiviser l'image ou d'ajuster le degré de sévérité de manière à éviter les fausses détections de cibles obscures.

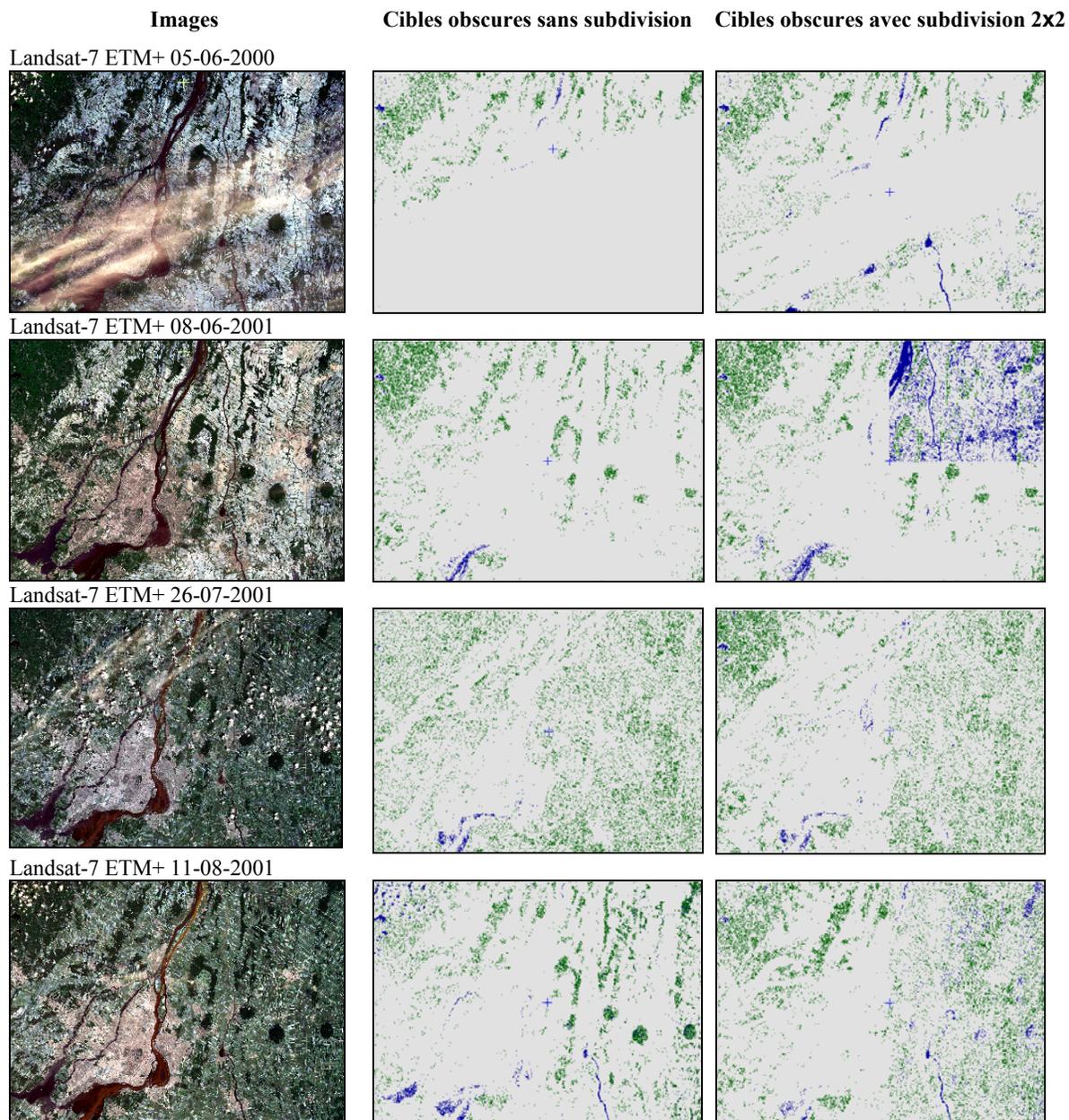


Figure VI-3. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-7 ETM+. Option de seuillage automatique avec ou sans subdivision (2x2) de l'image.

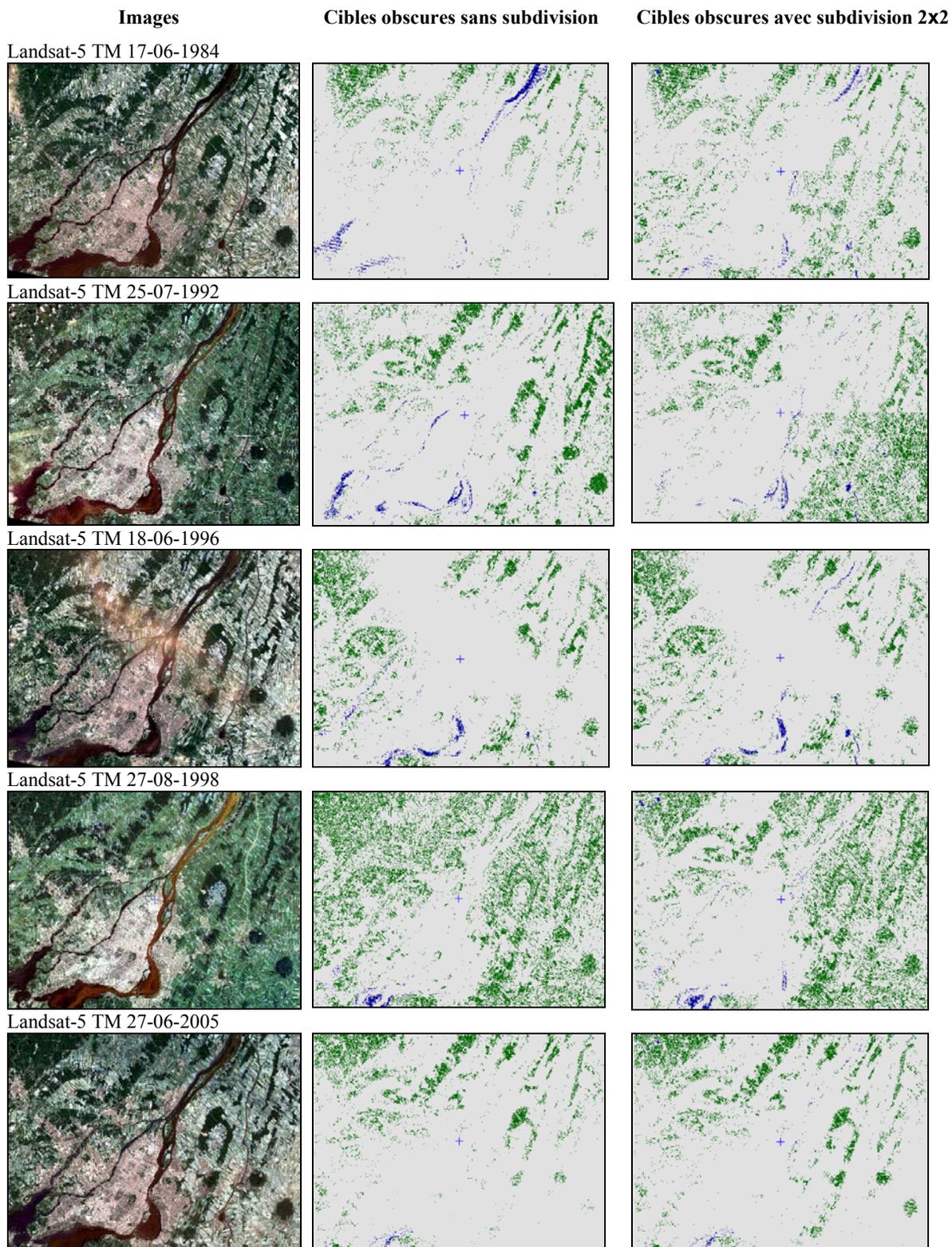
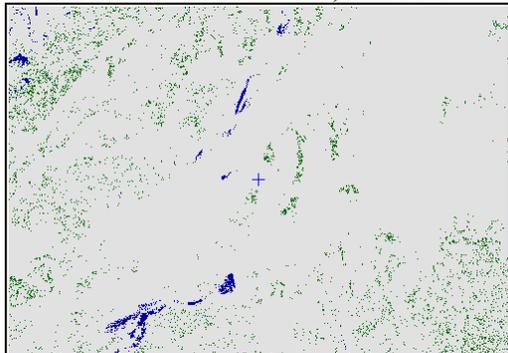


Figure VI-4. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-5 TM. Option de seuillage automatique avec ou sans subdivision (2x2) de l'image.

Landsat-7 ETM+ du 20-05-2000, subdivision 2x2



Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001, subdivision 2x2

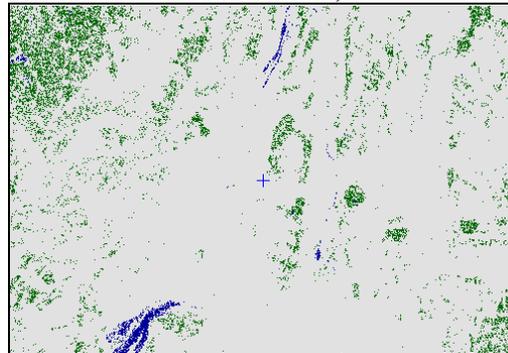
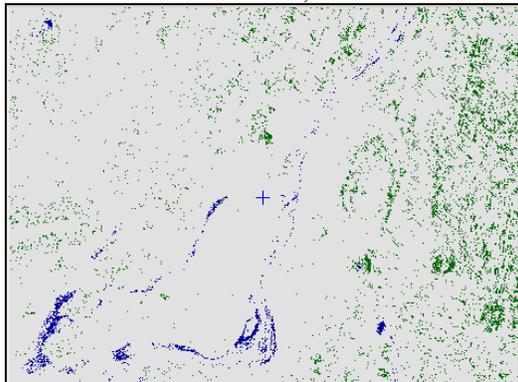


Figure VI-5. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-7 ETM+ avec subdivision de l'image (2x2). Option de choix manuel des seuils (degré de sévérité DS=70%).

Landsat-5 TM du 25-07-1992, subdivision 2x2



Landsat-5 TM du 27-08-1998, subdivision 2x2

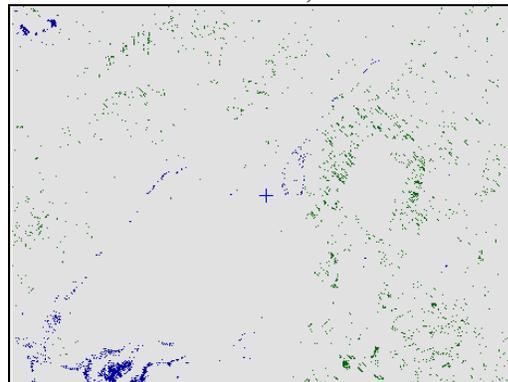


Figure VI-6. Recherche des cibles obscures (eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert) sur les images Landsat-5 TM avec subdivision de l'image (2x2). Option de choix manuel des seuils (degré de sévérité DS=70%).

Les valeurs des seuils de détection trouvées par « Mask » pour les bandes spectrales utilisées dans la recherche des cibles obscures sont reportées dans le tableau VI-1. Les valeurs minimales des VNs pour l'eau donnent une idée sur les conditions atmosphériques (l'effet additif) de l'image. Lorsque l'image est subdivisée en 2x2 cadrans, le programme « Mask », appliqué avec l'option automatique, trouve plus de pixels de cibles obscures (tableau VI-2), les pixels obscurs se trouvant dans les zones plus brumeuses sont extraits grâce à la subdivision des images. Ces pixels ne font pas parti des valeurs les plus basses de l'histogramme (qui respectent la condition de cible obscure) lorsque l'image est considérée dans son ensemble.

Tableau VI-1. Seuils de détection et nombre de pixels de cibles obscures de type eau claire et profonde et forêt dense. Option automatique, sans division de l'image.

Images	Seuils pour l'eau									Seuils pour la forêt		Nb pixels obscurs		
	Premiers minimums				Premier mode				2 <sup>ème</sup> min	PIR - Rouge	1 <sup>er</sup> mode Rouge	Eau	Forêt	
	PIR	Bleu	Vert	Rouge	PIR	Bleu	Vert	Rouge	PIR					
ETM+	20-05-2000	9	64	35	25	16	79	50	39	30	15	49	28051	358930
	05-06-2000	3	58	32	20	15	75	48	37	19	15	36	13579	271633
	08-06-2001	4	56	30	19	13	69	45	28	32	15	34	26597	543032
	26-07-2001	4	53	29	18	12	65	41	28	37	15	36	25699	968440
	11-08-2001	2	21	16	3	102	64	46	32	255	15	32	398927	586411
TM	17-06-1984	1	59	18	7	12	76	28	20	23	35	21	75425	350298
	25-07-1992	1	52	1	1	19	72	26	21	32	35	22	64798	760815
	18-06-1996	1	48	0	0	12	68	24	20	18	35	21	50763	608142
	27-08-1998	3	53	0	6	10	64	22	17	17	35	22	26689	1617576
	27-06-2005	1	58	18	12	11	72	26	18	26	35	21	8886	527665

Tableau VI-2. Nombre de pixels retenus comme cibles obscures de type eau claire et profonde et forêt dense. Option automatique avec subdivision (2x2) de l'image.

ETM+			TM		
Images	Nb pixels obscurs eau	Nb pixels obscurs forêt	Images	Nb pixels obscurs eau	Nb pixels obscurs forêt
20-05-2000	285701	370071	17-06-1984	38691	626627
05-06-2000	73224	386535	25-07-1992	39492	809920
08-06-2001	471276	580611	18-06-1996	44187	607994
26-07-2001	35050	915470	27-08-1998	48862	1189814
11-08-2001	134922	891232	27-06-2005	14516	592171

### VI-3 Application du code atmosphérique par cible obscure

L'approche utilisée pour estimer la profondeur optique des aérosols par la méthode des cibles obscures est une méthode itérative qui permet d'atteindre un bon degré de précision. Le principe est le suivant : à partir de la réflectance au sol des pixels des cibles obscures (supposée standard et connue), on cherche l'épaisseur optique des aérosols qui permet de calculer (à l'aide de l'équation 7) une réflectance apparente  $\rho_{CO}^{sat}(\rho_{CO}^{sol})$  égale (à un certain degrés de précision près) à celle calculée à partir de la valeur numérique  $\rho_{CO}^{sat}(VN)$ . Pour ces cibles obscures « CO », l'équation 7 s'écrit :

$$\rho_{CO}^{sat}(\rho_{CO}^{sol}) = T_{gaz} \left( \rho_{atm} + \frac{T^{\downarrow} t_{dir}^{\uparrow} \rho_{CO}^{sol} + T^{\downarrow} t_{dif}^{\uparrow} \rho_{env}}{1 - S_{alb} \rho_{env}} \right)$$

La réflectance apparente se calcule à partir des valeurs numériques selon les équations 5 et 6.

$$\rho_{CO}^{sat}(VN) = (a.VN + b) / L_{Lamb}^{sat}$$

Il est à noter que pour l'eau, la réflectance au sol est calculée comme la somme de la réflectance volumique de l'eau plus la réflectance des surfaces (Ahern *et al.* 1977-b; Royer *et al.* 1988-a).

Le processus itératif est initié à une valeur arbitraire de la profondeur optique de l'aérosol (par exemple 0.25). Les routines appropriées du code 6S permettent ensuite de calculer les paramètres de diffusion ( $\rho_{atm}$ ,  $T^{\downarrow}$ ,  $t_{dir}^{\uparrow}$  et  $t_{dif}^{\uparrow}$ ) pour cette valeur de profondeur optique de l'aérosol et de simuler la luminance apparente  $\rho_{CO}^{sat}(\rho_{CO}^{sol})$  au-dessus d'une cible obscure.

La réflectance volumique de l'eau claire est fixée à 0.015 dans le bleu, 0.011 dans le vert, 0.009 dans le rouge et 0.000 dans le PIR, tandis que la réflectance de surface de l'eau claire est fixée pour toutes les bandes à 0.020. Si la cible obscure est du type forêt dense, les calculs se font seulement pour les bandes bleu et rouge. Les réflectances de la cible pour les deux bandes spectrales utilisées sont 0.012 dans le bleu et 0.015 dans le rouge.

Si la différence absolue entre luminance apparente observée  $\rho_{CO}^{sat}(VN)$  et celle simulée  $\rho_{CO}^{sat}(\rho_{CO}^{sol})$  dépasse un seuil préétabli, le processus continue en modifiant la profondeur optique initiale en assumant qu'il existe une relation linéaire entre profondeur optique des aérosols et réflectance apparente et l'incrémentacion se fait selon le signe de la différence et sa magnitude. Le plus souvent 4 à 6 itérations suffisent pour que le processus converge. Le seuil a été fixé à 0.0005 unités de réflectance. Toutefois, ayant constaté que la convergence n'était pas assurée pour absolument tous les pixels, nous avons ajouté un test qui permet d'abandonner les calculs pour ce genre de pixels.

#### **VI-4 Généralisation des résultats à l'ensemble de l'image**

Un des avantages de la méthode des cibles obscures est de permettre dans une certaine mesure de prendre en compte aussi la variabilité spatiale des aérosols. En effet, en utilisant plusieurs cibles obscures à travers la scène analysée il est possible de généraliser le calcul de l'épaisseur optique à l'ensemble de l'image en ajustant une fonction polynomiale aux valeurs déduites aux différentes cibles obscures (Ahern *et al.* 1977-a). Ainsi, nous pouvons approcher les modèles 3-D qui prennent en compte aussi les variations selon les deux directions planes (Martonchik et Diner, 1985; Diner *et al.* 1988; Hashim *et al.* 2004), tout en évitant la complexité de calcul des codes 3-D. Selon Hadjimitsis *et al.* (2004), cette complexité n'est pas justifiable dans les applications courantes compte tenu du peu de précision supplémentaire qu'ils apportent. Une autre façon de généraliser l'AOD des pixels obscurs à l'ensemble de l'image consiste à effectuer une simple interpolation. Ainsi, tel que mentionné dans le chapitre IV, les programmes « Interp » et « Ajuste » de REFLECT ont été réalisés dans cet esprit. Nous allons utiliser ces deux programmes afin de montrer, à l'aide d'un exemple, la variabilité de l'AOD estimé sur une scène TM avec et sans subdivision de l'image dans l'étape de recherche des cibles obscures par le programme « Mask. »

#### **Exemple de variabilité spatiale de l'AOD**

Les cibles obscures d'eau profonde et de végétation dense extraites de l'image TM du 17-06-1984 avec et sans subdivision (figure IV-14) donnent, après échantillonnage d'environ 3000 pixels, les valeurs d'AOD<sub>550</sub> (issus de la bande rouge) illustrées sur la figure VI-7. L'échantillonnage (1 ligne sur 10 et 1 colonne sur 10) nous permet de réduire le temps de

calcul qui est d'environ 5 minutes pour les 3000 pixels retenus et qui aurait été trop long si tous les pixels obscurs détectés (plus de 400 000, tableaux VI-1 et VI-2) étaient gardés. La figure VI-7 montre que la subdivision 2x2 permet de trouver davantage de cibles obscures dans la partie Sud de l'image. Certains des pixels obscurs utilisés (1.6% sans subdivision et 3.5% avec subdivision 2x2) donnent des valeurs d'AOD surestimées ( $>0.25$ ), probablement aberrantes. L'interpolation à l'ensemble de l'image par la méthode de la pondération par l'inverse de la distance implémentée dans le module « Interp » de REFLECT donne les résultats de la figure VI-8, les valeurs jugées aberrantes sont propagées par l'interpolation. L'ajustement polynomial de l'AOD selon les lignes et les colonnes (module « Ajuste » de REFLECT) donne des surfaces qui lissent mieux les variations spatiales de l'AOD (figure VI-9). La subdivision de l'image a permis de ressortir la variabilité de l'AOD qui paraît plus élevé dans la partie Sud-est de la scène.

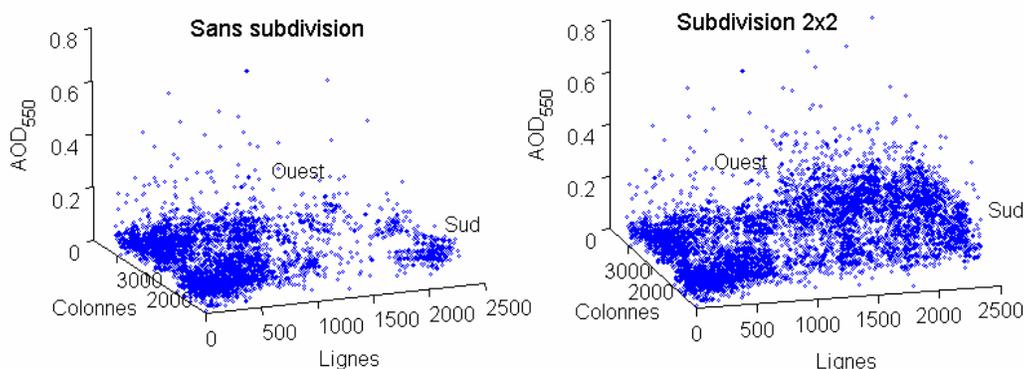


Figure VI-7. AOD estimé à partir des cibles obscures de l'image Landsat-5 TM du 17-06-1984 sans subdivision et avec subdivision (2x2) de l'image.

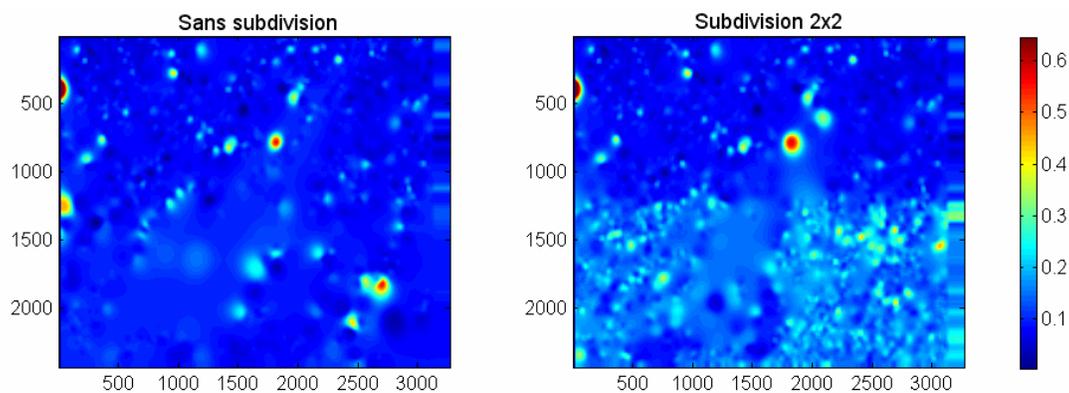


Figure VI-8. Interpolation de l'AOD issu des cibles obscures de l'image TM 17-06-1984 à l'ensemble de l'image.

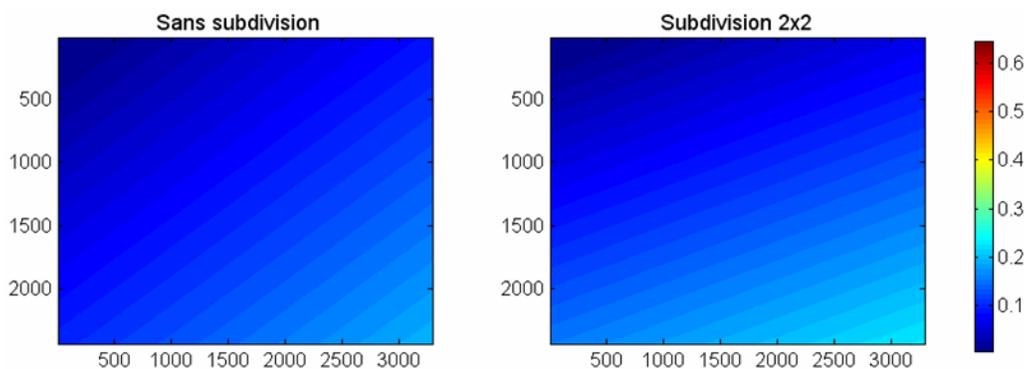


Figure VI-9. AOD généralisé à l'ensemble de l'image après ajustement polynomial d'ordre 1 de l'AOD des cibles obscures de l'image Landsat-5 TM du 17-06-1984 en fonction des lignes et des colonnes.

## VI-5 Comparaisons

Les valeurs d'AOD estimées à partir des images satellitales par la méthode des cibles obscures (valeur moyenne pour chaque image) sont souvent proches des données de AERONET (tableau VI-3). Elles sont parfois proches des estimations ( $AOD_{550,VIS}$ ) réalisées à partir de la visibilité mesurée par les stations météorologiques, notamment celle de Mirabel qui offre un éventail plus riche de valeurs. Pour la date où nous disposons d'une image satellitale et d'une mesure Microtops (le 27-06-2005, tableaux VI-3 et V-3), la méthode des cibles obscures appliquée à l'image TM donne la même valeur (moyenne) que la mesure.

Tableau VI-3. AOD provenant de diverses sources pour les dates des images utilisées. Les estimations par la méthode des cibles obscures sont de la forme moyenne  $\pm$  écart type.

Images	AOD <sub>550</sub> AERONET	Visibilité / AOD <sub>550,VIS</sub>			Estimations par les cibles obscures
		P. E. Trud.	Mirabel	St-Hubert	
TM 17-06-1984	Non disponible	24.1 / 0.14	12.9 / 0.30	25.0 / 0.14	0.12 $\pm$ 0.04
TM 25-07-1992	Non disponible	24.1 / 0.14	19.3 / 0.18	24.1 / 0.14	0.11 $\pm$ 0.03
TM 18-06-1996	Non disponible	24.1 / 0.14	40.2 / 0.08	24.1 / 0.14	0.06 $\pm$ 0.05
TM 27-08-1998	0.18 (CARTEL)	24.1 / 0.14	32.2 / 0.10	24.1 / 0.14	0.23 $\pm$ 0.04
TM 27-06-2005	0.47 (CARTEL)	20 / 0.18	32.3 / 0.10	15.0 / 0.25	0.11 $\pm$ 0.04
ETM+ 20-05-2000	Non disponible	32 / 0.1	40 / 0.08	24.1 / 0.14	0.12 $\pm$ 0.04
ETM+ 05-06-2000	Non disponible	48.3 / 0.07	40.2 / 0.08	24.1 / 0.14	0.15 $\pm$ 0.07
ETM+ 08-06-2001	0.08 (CARTEL)	24.1 / 0.14	40.2 / 0.08	24.1 / 0.14	0.07 $\pm$ 0.03
ETM+ 26-07-2001	0.04 (CARTEL)	48.3 / 0.07	72.4 / 0.04	24.1 / 0.14	0.06 $\pm$ 0.03
ETM+ 11-08-2001	0.07 (CARTEL)	24.1 / 0.14	72.4 / 0.04	24.1 / 0.14	0.07 $\pm$ 0.04
ETM+ 14-08-2002	0.60 (CARTEL)	14.5 / 0.26	8.0 / 0.6	6.4 / 0.88	0.45 $\pm$ 0.08
ALI 14-08-2002	0.60 (CARTEL)	14.5 / 0.26	8.0 / 0.6	6.4 / 0.88	0.40 $\pm$ 0.11
HRV 01-08-1987	Non disponible	72.4 / 0.04	72.4 / 0.04	25 / 0.14	0.10 $\pm$ 0.03
HRG 29-07-2006	Non disponible	24.1 / 0.14	24.1 / 0.14	15.0 / 0.25	0.22 $\pm$ 0.05

## CHAPITRE VII - Modélisation de l'effet d'adjacence

Selon la formulation présentée à la partie II, la réflectance de l'environnement intervient dans les calculs des deux façons :

1) Combinée à la diffusivité de l'atmosphère, elle est à la base de l'effet d'adjacence. L'importance relative de cet effet dans le signal mesuré dépend du contraste entre la réflectance de la cible et celle de son environnement. Ainsi, si un objet de faible réflectance est entouré d'objets brillants, l'effet d'adjacence peut être de l'ordre de la réflectance de l'objet (Tanré *et al.* 1981). Alter-Gartenberg *et al.* (2002) illustrent, grâce à des simulations de l'effet d'adjacence exprimé par le modèle de Kaufman (1984), l'inter-influence des polygones adjacents de 25 surfaces (matériaux) de signatures spectrales très différentes. Les auteurs montrent ainsi que l'effet d'adjacence peut causer des erreurs de classification d'images multispectrales ; et

2) combinée à l'albédo sphérique, elle est à la base d'un éclairage secondaire diffus de la cible visée et donc d'un rehaussement du signal de la cible. Selon Iqbal (1984), compte tenu de l'albédo sphérique de l'atmosphère qui excède rarement la valeur 0.15, cette source d'éclairage secondaire ne devient importante que si l'objet visé est entourée d'un objet hautement réfléchissant, tel la neige. C'est donc la relation entre la réflectance de l'environnement et l'effet d'adjacence qui est la plus importante à étudier.

### VII-1 Méthodes de calcul : état des choses

Le calcul de la réflectance de l'environnement sous des conditions opérationnelles d'application d'un logiciel d'estimation des réflectances au sol pixel par pixel d'une image pose plusieurs problèmes. En voici les plus importants : a) qu'est-ce qu'on considère comme voisinage d'un pixel donné dont les pixels contribuent à l'effet d'adjacence ? b) comment connaître la réflectance d'un pixel quelconque dans ce voisinage ? c) comment évaluer la contribution d'un pixel quelconque dans ce voisinage immédiat ? Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour trouver des solutions pratiques à ces problèmes. Nous pouvons les classer en deux catégories : la première fonctionne sur la base des statistiques de l'image calculées globalement ou localement et la deuxième introduit dans les calculs la distance entre un pixel et son voisinage immédiat. Selon Liang *et al.* (2001), aucune des méthodes proposées mêmes celles plus sophistiquées cherchant à évaluer la fonction de

transfert de l'atmosphère n'ont abouti à une solution satisfaisante du problème de l'effet d'adjacence.

#### **a. Les méthodes statistiques**

L'une des premières tentatives pour estimer la réflectance de l'environnement à partir des statistiques de l'image analysée est celle de Ahern *et al.* (1979) avec le logiciel TASIC développé au Centre Canadien de Télédétection. Cette réflectance était considérée constante pour toute la scène analysée. Elle était calculée à partir de la valeur moyenne des luminances pour l'ensemble de l'image. Par inversion du code atmosphérique utilisé sous des conditions standard (atmosphère claire, visibilité de 23 km), cette luminance moyenne était transformée en réflectance de l'environnement. Plus récemment Richter (1997) a introduit une méthode de calcul itérative plus adaptée aux variations locales des images. Pour ce faire, il utilise son code atmosphérique pour estimer la réflectance au sol par pixel en ignorant les effets de l'environnement. Si la réflectance du pixel central dans une fenêtre mobile de taille spécifiée par l'utilisateur diffère de la moyenne des pixels d'un certain seuil (par exemple, 20%, Richter 1991), cette valeur est réajustée selon la différence pondérée par une fonction qui tient compte de la capacité de diffusion de l'atmosphère. La taille de cette fenêtre varie entre 0,5 et 1 km au sol selon ces auteurs.

#### **b. Les méthodes utilisant des distances**

Selon ces méthodes, la réflectance de l'environnement est la somme des réflectances de tous les éléments de surface entourant la cible, pondérées par leur distance à la cible visée. Cette réflectance dépend de la diffusivité de l'atmosphère. Ainsi plus l'atmosphère est diffuse plus la contribution d'un élément lointain de la cible sera importante :

$$\rho_{env} = \int_0^{\infty} \rho(r) \cdot f(r) \cdot dr \quad (21)$$

où  $r$  est la distance géométrique entre un élément de surface quelconque et  $f(r)$  le poids accordé à la réflectance de l'élément en fonction de sa distance géométrique et de la diffusivité de l'atmosphère. Dans la situation du terrain telle que simplifiée dans le code 6S, la cible occupe la partie centrale d'une zone circulaire de rayon  $r$  et de réflectance notée  $\rho_{sol}^0$ ,

tandis que l'environnement s'étend à l'infini et possède une réflectance notée  $\rho_{sol}^l$ . Dans ce cas l'équation (21) se simplifie comme suit :

$$\rho_{env} = \rho_{sol}^0 F(r) + (1 - F(r)) \rho_{sol}^l \quad (22)$$

Le calcul de la fonction de l'environnement  $F(r)$  se fait tenant compte séparément des propriétés de diffusion de Rayleigh et de l'aérosol. Cette formulation a été introduite par Tanré et ses collaborateurs et incluse dans le code 5S (Tanré *et al.* 1981). Elle a été reprise dans le code 6S en introduisant aussi l'angle de visée du capteur pour mieux tenir compte des propriétés de diffusion des constituants atmosphériques dans cette direction spécifique (Vermote *et al.* 1997-a). Cette formulation est présentée au tableau VII-1. La figure VII-1 montre, à titre de comparaison, la variation de la fonction de l'environnement selon le rayon de l'objet qui occupe le centre de la cible visée, en utilisant la formulation originale du 5S et celle du 6S en tenant compte de l'angle de visée. Cette figure montre que plus l'objet dont le centre est occupé par la cible visée est grand, moins l'effet d'adjacence devient important dans le calcul de la réflectance de l'élément visé. Cependant, tel que mentionné, cette situation simplifiée est loin de représenter les conditions réelles dans le cas des images de télédétection.

Tableau VII-1. Fonction d'environnement pour le calcul de la réflectance de l'environnement

$f_A^0 = 1 - 0.448 \exp(-0.27r) - 0.552 \exp(-2.83r)$ $f_R^0 = 1 - 0.93 \exp(-0.08r) - 0.07 \exp(-1.1r)$ $f_R = f_R^0 \cdot [(1 - f_R^0) M_v + 1]$ $f_A = f_A^0 \{ [1 + a_0 M_v + b_0 M_v^2] + f_A^0 [a_1 M_v + b_1 M_v^2] + f_A^{0^2} [(-a_1 - a_0) M_v + (-b_1 - b_0) M_v^2] \}$ $F = (Tdif_A \cdot f_A + Tdif_R \cdot f_R) / (Tdif_A + Tdif_R)$ $a_0 = 1.3347; a_1 = -1.479; b_0 = 0.57757; b_1 = -1.5275;$
<ul style="list-style-type: none"> <li>. <math>r</math> : rayon de la zone circulaire dont la partie centrale est occupée par l'objet visé,</li> <li>. <math>Tdif_A</math> : transmittance de diffusion des aérosols (calculée par le code),</li> <li>. <math>Tdif_R</math> : transmittance de diffusion des molécules (calculée par le code),</li> <li>. <math>\mu_v = \cos(\theta_v)</math>, avec <math>\theta_v</math> angle de visée,</li> <li>. <math>\tau</math> : épaisseur optique totale de l'atmosphère (<math>\tau = \tau_a + \tau_R</math>)</li> <li>. <math>M_v = \log(\mu_v)</math></li> </ul>

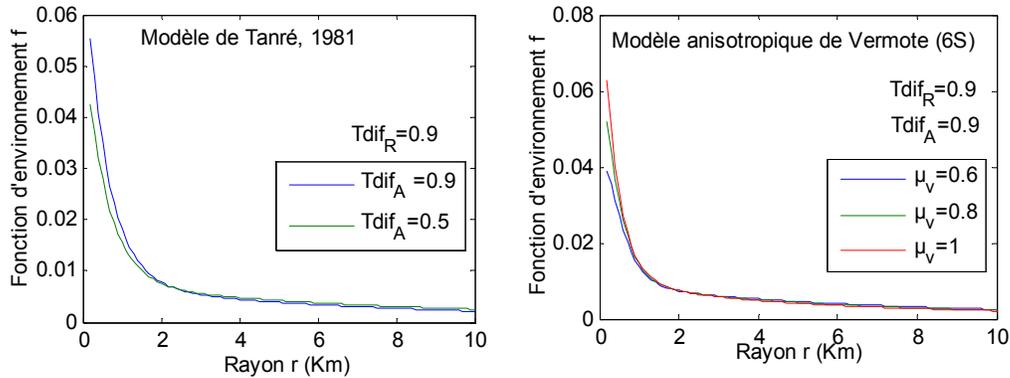


Figure VII-1. Illustration d'exemples des fonctions d'environnement des codes 5S et 6S.

Une autre approche qui tient implicitement compte de la distance entre les pixels du voisinage et le pixel visé est la méthode des anneaux qui considère l'environnement comme un ensemble d'anneaux de rayon  $r$  autour de la cible (Dana, 1982; Vermote *et al.* 1994; Zagolski et Gastellu-Etchegorry, 1995). Les réflectances moyennes des anneaux sont pondérées par une fonction d'environnement  $f(r)$  similaire à celle examinée plus haut. Santer *et al.* (1992) ont proposé de rajouter à la méthode des anneaux la prise en compte du contraste entre le pixel central et les pixels d'environnement. Selon cette idée, les pixels environnants ayant une valeur inférieure ou égale à celle du pixel visé ne créent pas d'effet d'adjacence alors que des pixels très brillants exercent un effet d'adjacence élevé sur les pixels visés ayant des valeurs numériques moins élevées.

La méthode de calcul de la réflectance de l'environnement selon la méthode des anneaux proposée par Vermote *et al.* (1994) a été introduite par Cavayas (2003) dans une première version du programme REFLECT. Les tests effectués avec cette formule pour calculer l'AOD à partir des pixels obscurs n'étaient pas concluants. La variabilité des résultats pour la même bande et les différences observées d'une bande à l'autre menaient à la conclusion que le phénomène d'adjacence devrait être beaucoup plus prononcé que celui estimé par la formulation de Vermote. Les approches introduisant l'idée d'une contribution individuelle de chaque pixel de l'environnement représentent mieux les conditions réelles d'une scène avec une grande hétérogénéité spatiale de la réflectivité. La spécularité de la réflexion de certains pixels de l'environnement doit être prise en compte. Cette idée a été à la base de l'élaboration de la méthode développée dans cette recherche.

## VII-2 La méthode proposée

Pour traiter l'effet d'adjacence, nous avons fait trois choix : (1) nous avons opté pour le modèle fonction d'environnement le plus récent proposé dans le cadre du code 6S tel que revu plus haut; (2) les pixels contribuent indépendamment à l'effet d'adjacence et sont considérés séparément dans le calcul de la moyenne pondérée de l'équation 21; (3) la réflectance de l'environnement possède une composante spéculaire décrite par le modèle de Phong (1975).

Dans la première version de REFLECT, Cavayas (2003) propose d'ajouter une composante spéculaire à la réflectance de l'environnement telle que :

$$\rho_{env} = \rho_{LAMB} + \rho_{sp} \quad (23)$$

Où  $\rho_{LAMB}$  est adaptée de Vermote *et al.* (1994) et représente la contribution du rayonnement diffus réfléchi par chaque pixel de l'environnement dans la fenêtre de calcul :

$$\rho_{LAMB} = \sum_i \sum_j f_r(d) (\rho[i, j] - \rho_{atm}) \frac{dx dy}{2\pi d} \quad (24-a)$$

$dx$  et  $dy$  représentent la taille du pixel et  $(2\pi d)$  et le périmètre de l'anneau à une distance  $d$  du centre  $[i, j]$  de la fenêtre. La contribution spéculaire était modélisée comme suit :

$$\rho_{sp} = \sum_i \sum_j f_r(d) \cos \gamma_{sp} \frac{(\rho[i, j] - \rho_{atm})}{k} \quad (24-b)$$

Où  $\gamma_{sp}$  est la direction de réflexion spéculaire (définie par l'équation 28 ci-bas). Le coefficient  $k$  permet de définir la portion du rayonnement total réfléchi par un pixel d'une façon spéculaire. Ce coefficient a été fixé à 100.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons une autre approche qui prend en compte la réflexion spéculaire (figure VII-2) au moyen d'une fonction notée  $g(\theta, \varphi)$  (équations 26-a et 26-b) inspirée du modèle de Phong (1975), ainsi :

$$\rho_{env} = \int_0^{\infty} \rho_e(r) f(r) g(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) dr \quad (25)$$

La contribution totale d'un pixel adjacent (de réflectance  $\rho_e$ ) s'exprime sous forme de la somme d'une composante diffuse (lambertienne) et d'une composante spéculaire :

$$g(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) = g_d + g_s(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) \quad (26-a)$$

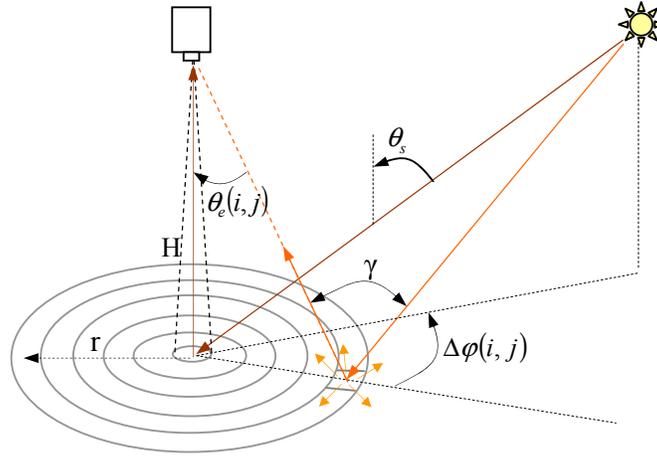


Figure VII-2. Représentation schématique de l'effet d'adjacence avec une réflectance d'environnement à composante spéculaire.

Les proportions diffuse et spéculaire de la luminance issue des pixels de l'environnement sont calculées à l'aide du modèle de Phong (Phong, 1975; Lafortune et Willems, 1994) par :

$$g(\gamma_{sp}) = k_d + k_s \cdot (\cos(\gamma_{sp}))^n \quad (26-b)$$

Avec la condition :  $\max(g(\gamma_{sp}))=1$ , c'est-à-dire  $k_d+k_s=1$ .

L'angle zénithal de la direction spéculaire est égal à celui du soleil  $\theta_s$  et son azimut est opposé à l'azimut solaire :  $\varphi_{sp} = \varphi_s + 180^\circ$ . L'influence de la composante spéculaire d'un pixel adjacent  $(i,j)$  dépend évidemment de sa position par rapport au pixel central  $(0,0)$ . La position azimutale du pixel  $(i,j)$  par rapport au pixel  $(0,0)$  peut se calculer par :

$$\varphi_e(i, j) = \arccos\left(\frac{-i}{\sqrt{i^2 + j^2}}\right) \cdot \text{signe}(j) \quad (27)$$

Enfin, l'influence de la réflexion spéculaire des pixels de l'environnement (définis par leurs coordonnées sphériques  $\theta_e$  et  $\varphi_e$ ) est pondérée par la combinaison de la direction spéculaire et de la position des pixels par la formule suivante :

$$\cos \gamma_{sp} = \cos \theta_s \cos \theta_e(i, j) + \sin \theta_s \sin \theta_e(i, j) \cos(\varphi_{sp} - \varphi_e(i, j)) \quad (28)$$

Notons que pour une visée du nadir, l'angle zénithal du pixel de l'environnement  $\theta_e$  se calcule pour un pixel  $(i,j)$  par  $\theta_e(i, j) = \tan^{-1}(r(i, j)/H_{sat})$  ; avec  $r(i,j)$  distance entre le pixel d'environnement et le pixel central et  $H_{sat}$  hauteur du satellite. Toutefois, comme  $H_{sat} \gg r$ , il est aussi possible de considérer une valeur unique  $\theta_e(i, j) = \theta_v$ .

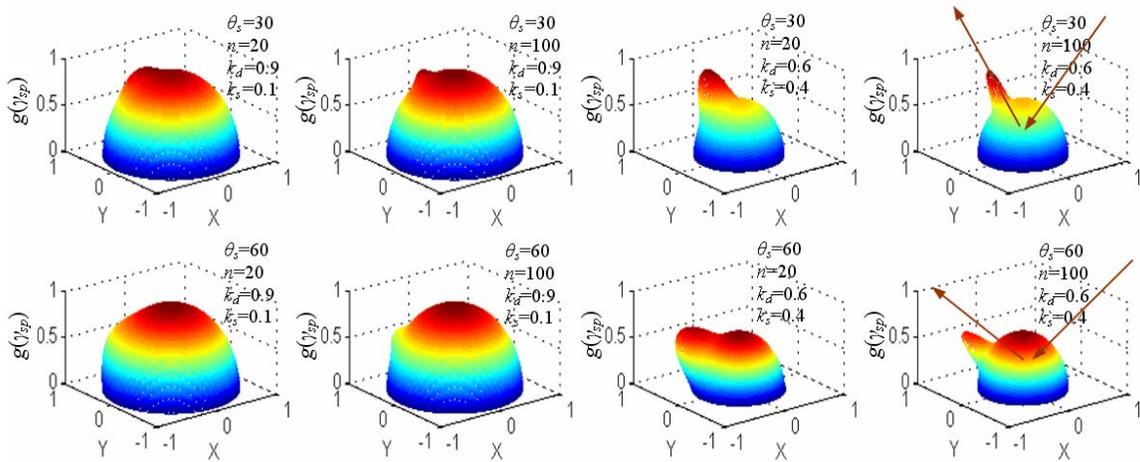


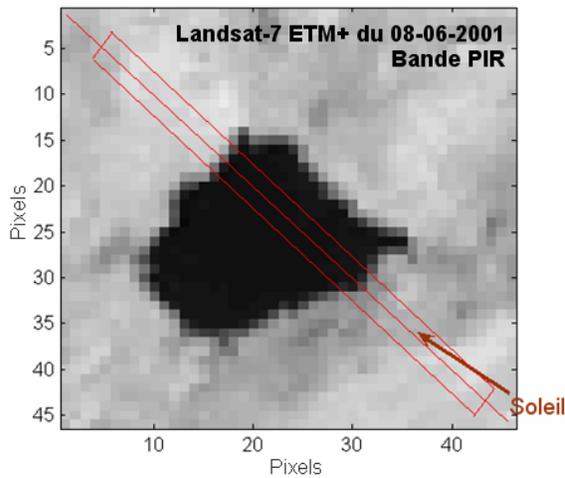
Figure VII-3. Fonction  $g(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)$  de pondération des composantes lambertienne et spéculaire de la réflectance d'environnement avec combinaisons de valeurs de  $\theta_s$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  et  $n$ .

Le choix de la taille de la fenêtre de calcul doit respecter un compromis entre deux conditions : (1) la prise en compte de tous les pixels de l'environnement pour lesquels  $f(r)$  possède une valeur significative (figure VII-1) et (2) l'économie du temps de calcul. La taille maximale de la fenêtre est définie dans notre cas par un rayon  $r$  de 1.5 km (50 pixels ETM+), ce qui est suffisant selon la fonction  $f(r)$  illustré sur la figure VII-1. Le paramètre « étendu du contour d'adjacence » est saisi dans l'interface graphique dans les étapes « Reflect » de calcul de la réflectance ou de « Dark » de calcul de l'AOD sur les cibles obscures (voir chapitre IV).

### Observation de l'effet spéculaire et détermination des paramètres $k_d$ , $k_s$ et $n$

Une observation qui suggère la présence d'un effet spéculaire sur des surfaces très foncées entourées de surfaces très claires est donnée par la figure VII-4. Cette figure montre le lac Hertel du Mont St-Hilaire, Montérégie, Québec (45° 32' 40" N ; 73° 09' 00" O), qui se situe au milieu d'une végétation (forêt) dense. Nous pouvons observer, pour une image Landsar-7 et une image SPOT 1, que les profils des valeurs numériques de la bande PIR suivent une certaine pente lorsqu'ils sont extraits dans le sens parallèle à l'azimut solaire. Les profils des pixels extraits dans le sens orthogonal à l'azimut solaire ne montrent pas cette tendance. Nous allons essayer d'extraire les paramètres ( $k_d$ ,  $k_s$ ) à partir de ces observations.

Diagonale parallèle à l'azimut solaire



Diagonale orthogonale à l'azimut solaire

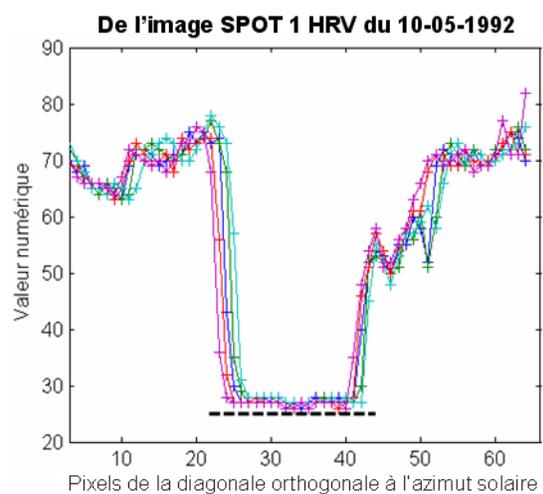
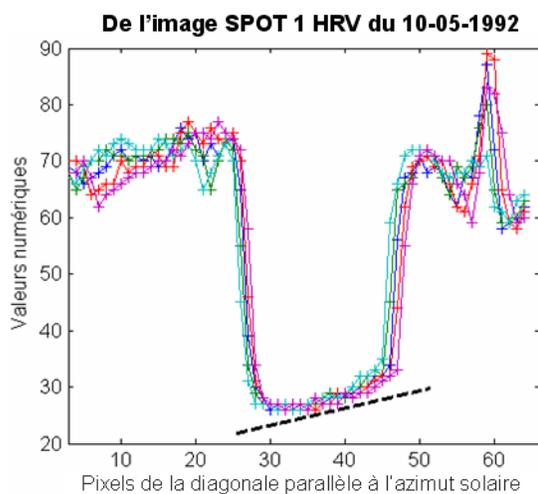
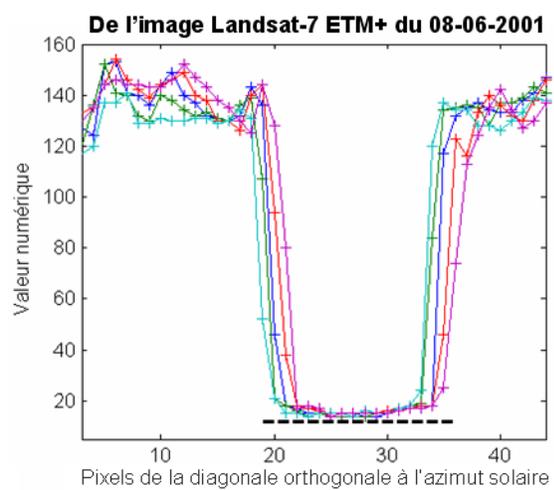
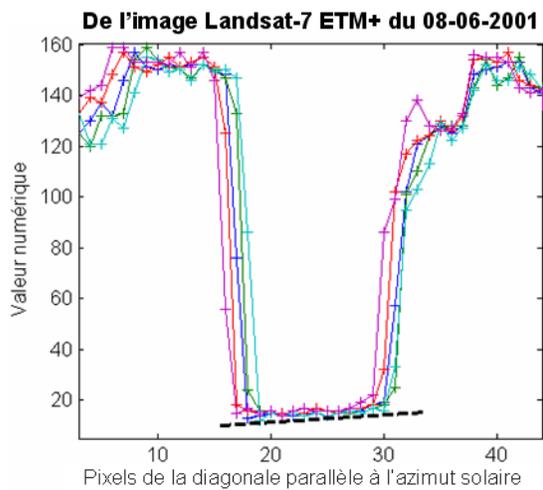
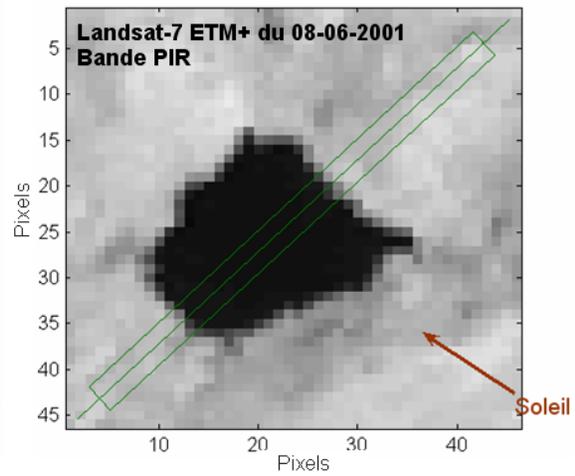


Figure VII-4. Observation de l'effet spéculaire de la réflectance de l'environnement sur les bandes PIR d'une image Landsat-7 ETM+ et d'une image SPOT 1 HRV couvrant le lac Hertel du Mont St-Hilaire, Montérégie, Québec ( $45^{\circ} 32' 40''$  N ;  $73^{\circ} 09' 00''$  O).

Sur la figure VII-5, la réflectance apparente (formule simplifiée) pour les pixels foncés 1 et 2 se calcule en combinant les équations 7, 25 et 26-b par :

$$\rho_{\text{foncé}}^{\text{sat}} = T_{\text{gaz}} \rho_{\text{atm}} + T_{\text{gaz}} T^{\downarrow} t_{\text{dir}}^{\uparrow} \rho_{\text{foncé}} + T_{\text{gaz}} T^{\downarrow} t_{\text{dif}}^{\uparrow} \sum [f(r)(k_d + k_s \cos(\gamma_{sp})^n) \rho_e(r)]$$

Si l'on considère uniquement l'effet des pixels clairs sur les pixels foncés, on peut écrire :

Pour le point 1 :  $\rho_{\text{foncé}}^{\text{sat}}(1) = \rho_{\text{atm}} + T_{\text{gaz}} T^{\downarrow} t_{\text{dir}}^{\uparrow} \rho_{\text{foncé}} + T_{\text{gaz}} T^{\downarrow} t_{\text{dif}}^{\uparrow} \rho_{\text{clair}}(k_d + k_s)$

Pour le point 2 :  $\rho_{\text{foncé}}^{\text{sat}}(2) = \rho_{\text{atm}} + T_{\text{gaz}} T^{\downarrow} t_{\text{dir}}^{\uparrow} \rho_{\text{foncé}} + T_{\text{gaz}} T^{\downarrow} t_{\text{dif}}^{\uparrow} \rho_{\text{clair}} k_d$

Ainsi, de la soustraction des réflectances apparentes des pixels 1 et 2, on peut retrouver :

$$k_s = \frac{\rho_{\text{foncé}}^{\text{sat}}(1) - \rho_{\text{foncé}}^{\text{sat}}(2)}{T_{\text{gaz}} T^{\downarrow} t_{\text{dif}}^{\uparrow} \rho_{\text{clair}}} \quad (29)$$

En calculant les réflectances apparentes à partir des l'exemples de la figure VII-4, et en utilisant les paramètres atmosphériques calculés par REFLECT (voir tableau VIII-2 plus loin), les calculs donnent la valeur 0.14 pour  $k_s$  alors que  $k_d$  vaut 0.86. L'exposant «  $n$  » est toutefois moins simple à estimer. Nous avons pris la valeur  $n=50$  qui correspond à une situation intermédiaire entre les cas illustrés sur la figure VII-3 avec  $n=20$  et  $n=100$ .

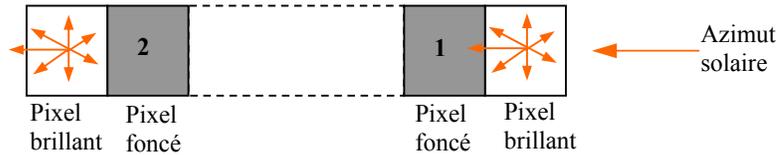


Figure VII-5. Effet d'adjacence spéculaire d'un pixel brillant sur un pixel foncé selon la position des pixels par rapport à l'azimut solaire.

## **CHAPITRE VIII - Validation du logiciel REFLECT : le cas des terrains horizontaux**

### **VIII-1 Correction des images – paramètres atmosphériques**

Avec toutes les modifications apportées aux calculs des paramètres atmosphériques décrits dans les chapitres précédents, nous avons décidé dans un premier temps de procéder à la validation du logiciel REFLECT dans le cas des terrains sans relief important. Les développements et la validation du logiciel concernant un terrain à relief accidenté sont présentés dans le chapitre suivant.

La validation du logiciel sous la condition d'un terrain horizontal s'est faite pour trois niveaux d'échantillonnage spatial : (1) pour les scènes entières (région de Montréal, figure VIII-1), en comparant les distributions des valeurs numériques et celles des réflectances au sol de toutes les images disponibles (prises en période d'été), (2) pour des pixels représentant des matériaux choisis dans la librairie des signatures spectrales ASTER de USGS (eau claire, eau trouble, asphalte, conifères, feuillus et gazon), en comparant les réflectances au sol calculées à partir des images avec celles calculées à l'aide de l'application « SigSpec\_Librairie » présentée dans la section II-4, (3) en comparant les réflectances au sol estimées par REFLECT et celles mesurées par un radiomètre ASD pour certains points de mesure (agriculture et toiture de bâtiment brillante).



Figure VIII-1. Scène utilisée pour comparer les distributions des VN et des réflectances au sol issues de REFLECT pour 5 images Landsat-5 TM, 2 images Landsat-7 ETM+, une image SPOT 1 HRV et une images SPOT 5 HRG.

## - Transmittances gazeuses

Les transmittances gazeuses sont calculées en estimant le contenu en vapeur d'eau dans l'air à partir des données d'humidité relative de l'air ( $H_r$ ) et de la température ambiante ( $T_a$ ) récupérées des archives climatiques nationales du Canada pour la station de l'aéroport Pierre-Elliott-Trudeau qui se situe approximativement au centre de la scène découpée autour de Montréal (tableau VIII-1). L'effet de  $H_r$  ( $T_{gaz}$  plus faible pour  $H_r$  plus élevé, et vice versa) se voit dans la bande PIR à cause des raies d'absorption de la vapeur d'eau entre des longueurs d'onde 800 et 840 nm (voir annexe 1, figure A1.e). Les transmittances gazeuses sont proches de 1 dans les faibles longueurs d'onde (bande bleue) et diminuent plus on s'approche des longueurs d'onde du MIR et ce à cause de l'absorption de la vapeur d'eau.

Tableau VIII-1. Transmittances gazeuses calculées pour les images utilisées pour la validation de REFLECT. La température et l'humidité relative de l'air ont servi à estimer le contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Images	Température (°C)	Humidité relative (%)	Transmittance gazeuse totale ( $T_{gaz}$ )					
			Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR	
TM	17-06-1984	22	60	0.9931	0.9508	0.9492	0.9159	0.8723
	25-07-1992	23	65	0.9932	0.9494	0.9473	0.9081	0.8647
	18-06-1996	22	46	0.9929	0.9522	0.9512	0.9268	0.8824
	27-08-1998	24	70	0.9929	0.9463	0.9439	0.8991	0.8560
	27-06-2005	27	56	0.9933	0.9495	0.9473	0.9061	0.8636
ETM+	08-06-2001	20	42	0.9946	0.9595	0.9565	0.9470	0.9462
	11-08-2001	23	43	0.9948	0.9588	0.9551	0.9391	0.9407
HRV	01-08-1987	21	42	-	0.9725	0.9588	0.9339	-
HRG	29-07-2006	27	60	-	0.9675	0.9478	0.9069	0.9574

## - AOD par la méthode des cibles obscures et paramètres de diffusion

L'AOD à 550 nm est estimée par la méthode des cibles obscures pour l'ensemble des images (tableau VIII-2). Une valeur moyenne a été retenue puisque la distribution spatiale de l'AOD ne montrait pas de différences importantes. Nous pouvons voir que la majorité des images ont une atmosphère assez claire. Dans les paramètres atmosphériques, nous pouvons également voir l'importance de l'effet additif dans les faibles longueurs d'onde (bande bleue). Toutefois, grâce à la nouvelle loi d'interpolation  $AOD(\lambda) = f(AOD_{550}, \lambda)$ , donnée par l'équation 17, les paramètres de diffusion ( $t_{dif}^{\downarrow}$ ,  $t_{diff}^{\uparrow}$ ,  $\rho_{atm}$  et  $S_{alb}$ ) ne sont plus surestimés dans la bande bleue, par rapport à des tests réalisés avec la loi originale du 6S (données non présentées).

Tableau VIII-2. AOD issus de la méthode des cibles obscures et paramètres atmosphériques ( $t_{dir}^{\downarrow}$ ,  $t_{diff}^{\downarrow}$ ,  $t_{dir}^{\uparrow}$ ,  $t_{diff}^{\uparrow}$ ,  $\rho_{atm}$  et  $S_{alb}$ ) correspondants calculés par REFLECT pour les images utilisées pour la validation.

Images		AOD <sub>550</sub>	$t_{dir}^{\downarrow}$					$t_{diff}^{\downarrow}$					$t_{dir}^{\uparrow}$				
			Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR	Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR	Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR
TM	17-06-1984	0.12	0.7236	0.8124	0.8697	0.9327	0.9981	0.1009	0.0831	0.0627	0.0279	0	0.7584	0.8372	0.8875	0.9422	0.9984
	25-07-1992	0.11	0.7114	0.8035	0.8633	0.9293	0.9980	0.1037	0.0858	0.0648	0.0287	0	0.7584	0.8372	0.8875	0.9422	0.9984
	18-06-1996	0.06	0.7669	0.8536	0.9050	0.9544	0.9984	0.0840	0.0640	0.0456	0.0197	0	0.8012	0.8762	0.9200	0.9618	0.9986
	27-08-1998	0.23	0.5977	0.6993	0.7751	0.8745	0.9972	0.1318	0.1199	0.0964	0.0425	0	0.6795	0.7645	0.8259	0.9042	0.9979
	27-06-2005	0.11	0.7292	0.8164	0.8726	0.9342	0.9982	0.0996	0.0819	0.0617	0.0275	0	0.7584	0.8372	0.8875	0.9422	0.9984
ETM+	08-06-2001	0.06	0.7670	0.8538	0.9103	0.9561	0.9983	0.0817	0.0640	0.0435	0.0193	0	0.7918	0.8701	0.9206	0.9613	0.9985
	11-08-2001	0.07	0.7011	0.7962	0.8645	0.9286	0.9978	0.1035	0.0882	0.0645	0.0293	0	0.7488	0.8306	0.8882	0.9414	0.9982
HRV	01-08-1987	0.10	-	0.7953	0.8626	0.9302	-	-	0.0885	0.0661	0.0301	-	-	0.8144	0.8760	0.9372	-
HRG	29-07-2006	0.22	-	0.7079	0.7971	0.8902	0.9971	-	0.1193	0.0919	0.0405	0	-	0.7425	0.8225	0.9046	0.9975

$t_{diff}^{\uparrow}$					$\rho_{atm}$					$S_{alb}$				
Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR	Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR	Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR
0.0924	0.0751	0.0563	0.0253	0	0.0758	0.0426	0.0258	0.0125	0.0017	0.0863	0.0626	0.0459	0.0277	0.0072
0.0924	0.0751	0.0563	0.0253	0	0.0727	0.0429	0.0262	0.0126	0.0017	0.0863	0.0626	0.0459	0.0277	0.0072
0.0745	0.0560	0.0396	0.0172	0	0.0700	0.0378	0.0219	0.0099	0.0011	0.0898	0.0611	0.0416	0.0222	0.0042
0.1190	0.1051	0.0834	0.0380	0	0.0859	0.0508	0.0335	0.0183	0.0030	0.0809	0.0642	0.0517	0.0361	0.0122
0.0924	0.0751	0.0563	0.0253	0	0.0753	0.0423	0.0257	0.0124	0.0017	0.0863	0.0626	0.0459	0.0277	0.0072
0.0752	0.0582	0.0394	0.0175	0	0.0728	0.0398	0.0215	0.0099	0.0012	0.0927	0.0637	0.0413	0.0224	0.0044
0.0926	0.0774	0.0561	0.0258	0	0.0770	0.0460	0.0260	0.0129	0.0019	0.0887	0.0648	0.0457	0.0280	0.0075
-	0.0826	0.0613	0.0281	-	-	0.0457	0.0246	0.0105	-	-	0.0691	0.0492	0.0290	-
-	0.1114	0.0849	0.0379	0	-	0.0535	0.0306	0.0161	0.0027	-	0.0686	0.0524	0.0360	0.0129

## VIII-2 Comparaison des VNs et des réflectances au sol pour l'ensemble de la scène

Afin de voir l'effet d'homogénéisation des images par les corrections atmosphériques, nous allons examiner les distributions de fréquence des VNs et celles de réflectances au sol. Les minimums (5<sup>ème</sup> percentiles) nous permettent d'apprécier la correction des effets additifs et des offsets des capteurs alors que les maximums (95<sup>ème</sup> percentiles) offrent la possibilité d'apprécier la correction des effets multiplicatifs et des gains des capteurs.

Tableau VIII-3. 5<sup>ème</sup> percentiles des VNs et des réflectances au sol issues des images utilisées pour la validation de REFLECT (B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement).

Images		5 <sup>ème</sup> percentile de VN					5 <sup>ème</sup> percentile de $\rho_{sol}$				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<b>TM</b>	17-06-1984	70	28	20	12	7	0.039	0.047	0.029	0.030	0.008
	25-07-1992	67	26	20	19	10	0.041	0.045	0.031	0.045	0.011
	18-06-1996	65	26	19	13	8	0.037	0.046	0.030	0.032	0.010
	27-08-1998	61	23	18	12	7	0.031	0.039	0.027	0.027	0.007
	27-06-2005	66	26	20	13	7	0.034	0.041	0.031	0.029	0.008
<b>ETM+</b>	08-06-2001	66	48	32	17	15	0.029	0.033	0.027	0.034	0.011
	11-08-2001	61	43	30	17	13	0.031	0.036	0.026	0.036	0.009
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	30	16	14	-	-	0.034	0.027	0.041	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	80	50	17	16	-	0.039	0.028	0.038	0.010

Tableau VIII-4. 95<sup>ème</sup> percentiles des VNs et des réflectances au sol issues des images utilisées pour la validation de REFLECT (B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement).

Images		95 <sup>ème</sup> percentile de VN					95 <sup>ème</sup> percentile de $\rho_{sol}$				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<b>TM</b>	17-06-1984	118	58	65	132	137	0.132	0.146	0.151	0.494	0.308
	25-07-1992	98	45	48	133	103	0.115	0.123	0.124	0.514	0.283
	18-06-1996	105	52	61	134	132	0.121	0.141	0.149	0.495	0.305
	27-08-1998	85	37	41	118	88	0.112	0.118	0.119	0.512	0.275
	27-06-2005	105	51	60	132	131	0.111	0.133	0.141	0.487	0.299
<b>ETM+</b>	08-06-2001	117	106	123	141	161	0.120	0.142	0.153	0.511	0.309
	11-08-2001	97	83	93	122	131	0.010	0.119	0.135	0.495	0.295
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	57	44	101	-	-	0.121	0.128	0.484	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	205	175	171	185	-	0.136	0.143	0.501	0.301

Nous pouvons observer sur les tableaux VIII-3 et VIII-4 (et les figures VIII-2 et VIII-3) que les différences entre les VNs sont importantes pour les différentes dates (donc conditions atmosphériques) et les différents capteurs (gains). Les réflectances au sol sont moins variables, les variations de  $\rho_{sol}$  n'excèdent pas 0.01 pour les faibles réflectances (bandes du visible) et 0.02 pour les fortes réflectances (PIR et MIR).

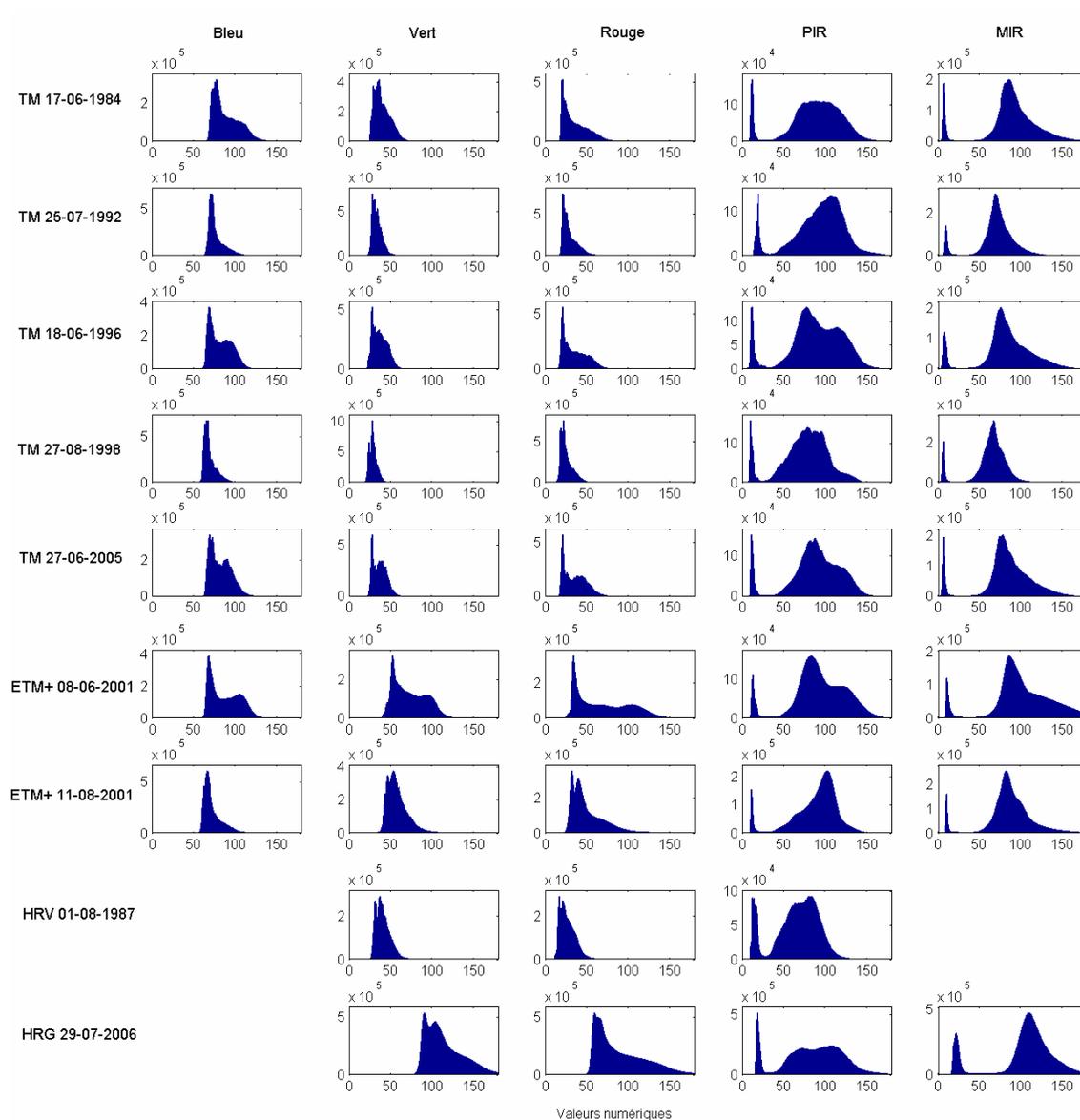


Figure VIII-2. Histogrammes des VNs des images utilisées pour la validation des corrections atmosphériques de REFLECT.

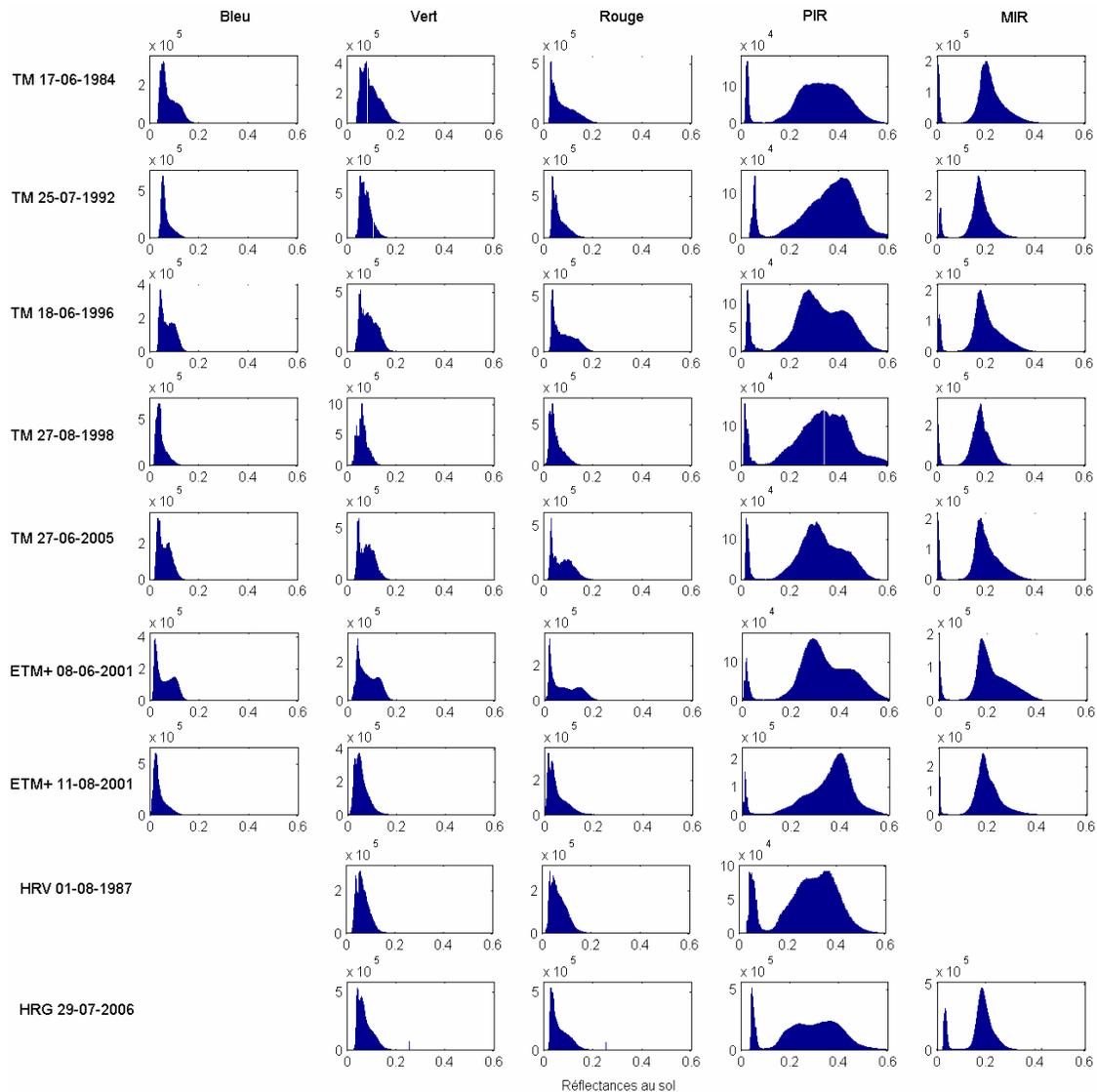


Figure VIII-3. Histogrammes des réflectances au sol calculées par REFLECT pour les images utilisées pour la validation des corrections atmosphériques de REFLECT.

### VIII-3 Comparaison des VNs et des réflectances au sol des sites sélectionnés

Les sites de validation identiques à toutes les images correspondant aux matériaux eau claire, eau turbide, asphalte, conifères, feuillus et gazon sont sélectionnés comme indiqué dans le tableau VIII-5 et illustré sur les figures VIII-4-a à VIII-4-e. Nous pouvons observer dans le tableau VIII-6 une variabilité importante des VNs en fonction du type de capteur. La variabilité en fonction de la date est moins importante pour les capteurs TM et ETM+. Les VNs des 5 images Landsat-5 TM et des 2 images Landsat-7 ETM+ présentent une certaine stabilité. La raison est que ces capteurs possèdent un gain unique par bande spectrale et que

les images ont été acquises à la même saison et aux mêmes heures (faibles différences de l'éclairement solaire). Toutefois, les VNs de SPOT HR sont non seulement différentes des VNs des autres capteurs, mais aussi différentes entre elles. La raison est que SPOT offre des gains variables pour chacune des bandes spectrales (voir annexe 4). Les gains pour l'image SPOT 1 du 01-08-1987 étaient de 0.852, 0.794 et 0.888 dans les bandes verte, rouge et PIR, respectivement, et de 2.33, 2.8 et 1.31 dans les mêmes bandes pour l'image SPOT 5 du 29-07-2006. Ainsi, la variation des VNs est affectée davantage par le capteur que par les conditions atmosphériques qui correspondent généralement à un ciel clair.

La variabilité des réflectances au sol issues des différentes images est fortement diminuée par rapport à celle des VNs (tableau VIII-7). Pour chaque matériau et chaque bande spectrale, les réflectances au sol sont très proches en fonction des capteurs et des dates d'acquisition. La variation ne dépasse pas  $\pm 0.01$  en unité de réflectance dans la majorité des cas. Dans le cas de la végétation (conifères, feuillus et gazon), les réflectances issues des images sont plus faibles que celles données dans la librairie ASTER probablement à cause des pixels mixtes.

Notons que, pour les différents capteurs, nous avons donné des valeurs uniques pour les réflectances des matériaux de la librairie ASTER calculées par « SigSpec\_Librairie » (tableau VIII-7). La raison est que les différences entre les réflectances intégrées par bande spectrale des capteurs utilisés (TM, ETM+, HRV et HRG) étaient très faibles (moins de 0.01).

Tableau VIII-5. Sites utilisés pour la comparaison des réflectances au sol de matériaux sélectionnés sur les images avec leurs réflectances données par la librairie ASTER. Tous les sites sont situés dans la province de Québec, Canada (voir figure VIII-4).

<b>Matériau</b>	<b>Site</b>	<b>Coordonnées</b>
Eau claire (Lacs)	Lac Hertel, Mont St-Hilaire	45° 32' 40" N 73° 09' 00" O
	Lac Seigneurie, Mont St-Bruno	45° 32' 50" N 73° 19' 35" O
	Lac L'Achigan, Laurentides	45° 56' 30" N 73° 58' 00" O
	Lac Connelly, Laurentides	45° 53' 50" N 73° 58' 00" O
Eau turbide (Fleuve)	Fleuve St-Laurent, rive sud de Montréal	
Asphalte (Routes)	Autoroutes, rives nord et sud de Montréal	
Conifères	Ste-Thérèse-de-Blainville, Laurentides	45° 43' 15" N 73° 49' 00" O
Feuillus		
Gazon	Parc Maisonneuve, Montréal	45° 33' 48" N 73° 33' 50" O

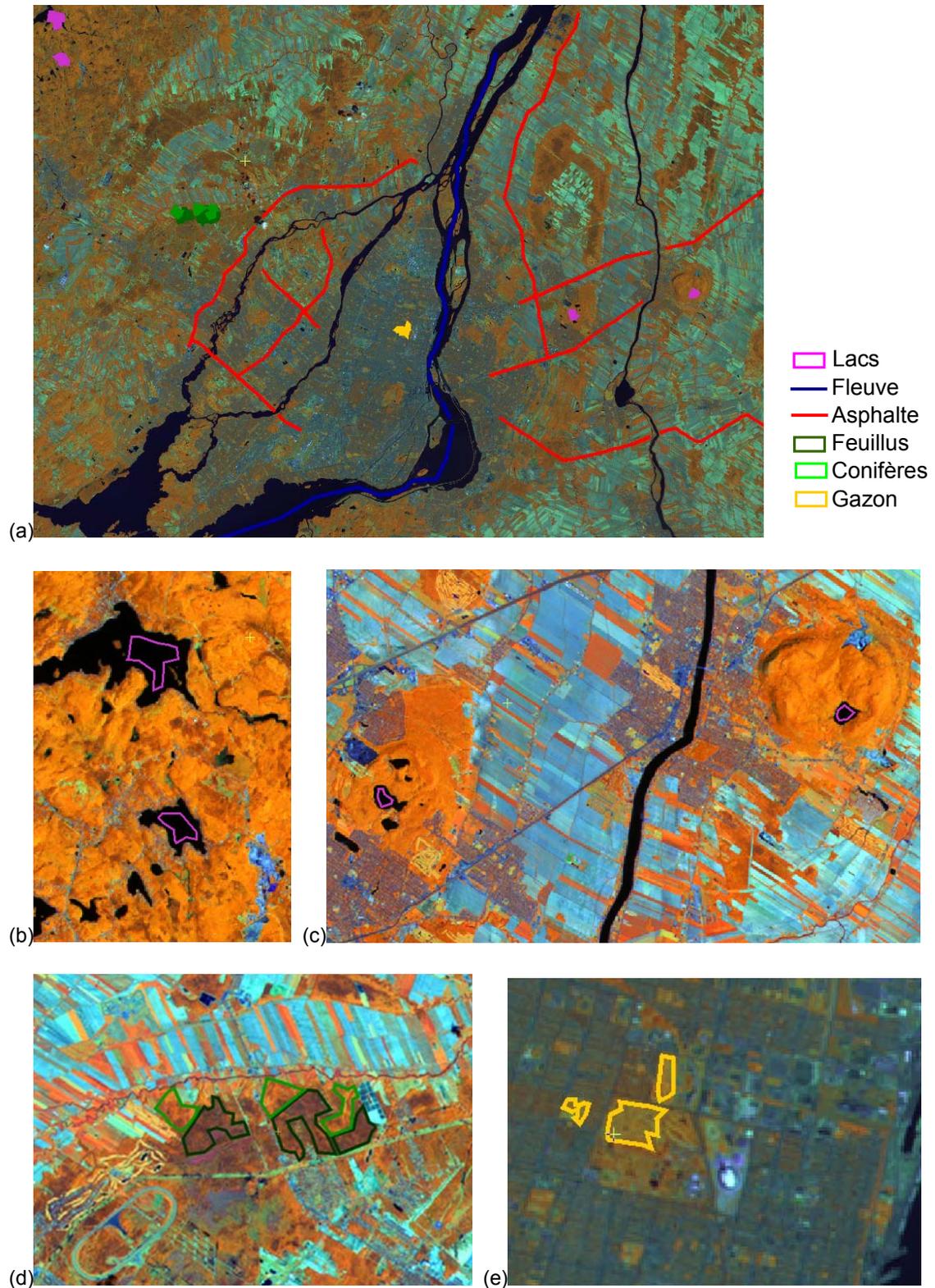


Tableau VIII-6. Moyennes des VN des matériaux sélectionnés pour la validation des corrections atmosphériques sur les images Landsat et SPOT utilisées (nd : non disponible; B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement).

Images		Eau claire (lacs)					Eau trouble (fleuve)				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<b>TM</b>	17-06-1984	66	22	15	13	8	76	28	20	12	7
	25-07-1992	65	23	18	20	9	73	28	21	18	9
	18-06-1996	64	21	16	15	7	69	25	20	12	8
	27-08-1998	59	20	14	14	6	68	25	17	11	6
	27-06-2005	63	21	16	15	7	72	27	20	12	7
<b>ETM+</b>	08-06-2001	62	36	24	13	11	71	45	32	13	12
	11-08-2001	60	36	25	12	10	68	45	30	12	10
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	nd	nd	nd	-	-	40	22	16	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	nd	nd	nd	nd	-	101	63	19	21

Images		Asphalte (routes)					Gazon (parcs)				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<b>TM</b>	17-06-1984	101	46	46	69	88	89	41	36	114	117
	25-07-1992	88	40	40	69	77	78	36	30	116	94
	18-06-1996	90	41	43	69	81	75	34	29	122	101
	27-08-1998	78	34	35	60	69	72	31	29	88	92
	27-06-2005	91	41	42	71	75	76	34	29	122	96
<b>ETM+</b>	08-06-2001	94	76	73	74	86	77	64	49	127	108
	11-08-2001	89	75	78	64	94	75	62	61	92	123
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	50	37	59	-	-	39	25	98	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	151	136	68	114	-	108	78	125	135

Images		Conifères					Feuillus				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<b>TM</b>	17-06-1984	72	31	22	89	68	73	32	22	116	82
	25-07-1992	69	29	22	89	54	70	29	22	112	67
	18-06-1996	65	28	20	95	61	67	29	21	122	74
	27-08-1998	62	24	19	72	48	63	24	19	87	57
	27-06-2005	67	28	21	100	62	67	28	21	123	75
<b>ETM+</b>	08-06-2001	68	54	36	99	71	68	54	35	124	82
	11-08-2001	64	47	33	84	61	63	47	32	100	71
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	32	17	74	-	-	32	17	88	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	90	58	98	93	-	90	58	118	109

Tableau VIII-7. Moyennes des réflectances au sol des matériaux sélectionnés pour la validation des corrections atmosphériques sur les images Landsat et SPOT utilisées (nd : non disponible; B, V et R désignent les bandes bleue, verte et rouge, respectivement).

Images		Eau claire					Eau trouble				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<i>Librairie ASTER - USGS</i>		0.02	0.04	0.03	0.00	0.00	0.03	0.06	0.06	0.02	0.00
<b>TM</b>	17-06-1984	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.04	0.05	0.04	0.02	0.00
	25-07-1992	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.05	0.06	0.04	0.04	0.01
	18-06-1996	0.03	0.03	0.02	0.02	0.00	0.04	0.06	0.04	0.03	0.00
	27-08-1998	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00
	27-06-2005	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00
<b>ETM+</b>	08-06-2001	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.03	0.02	0.00
	11-08-2001	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.04	0.02	0.01	0.00
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	nd	nd	nd	-	-	0.06	0.04	0.04	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	nd	nd	nd	nd	-	0.05	0.03	0.03	0.02

Images		Asphalte					Gazon				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<i>Librairie ASTER - USGS</i>		0.15	0.19	0.22	0.26	0.37	0.04	0.09	0.05	0.49	0.30
<b>TM</b>	17-06-1984	0.10	0.12	0.11	0.25	0.20	0.07	0.10	0.08	0.42	0.27
	25-07-1992	0.09	0.11	0.10	0.26	0.19	0.06	0.09	0.06	0.44	0.23
	18-06-1996	0.09	0.11	0.10	0.25	0.19	0.06	0.08	0.06	0.44	0.24
	27-08-1998	0.08	0.10	0.09	0.25	0.18	0.06	0.08	0.06	0.41	0.24
	27-06-2005	0.08	0.10	0.09	0.25	0.17	0.05	0.07	0.06	0.44	0.22
<b>ETM+</b>	08-06-2001	0.08	0.09	0.09	0.25	0.18	0.04	0.07	0.05	0.45	0.23
	11-08-2001	0.08	0.10	0.10	0.24	0.20	0.05	0.07	0.06	0.39	0.27
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	0.10	0.10	0.25	-	-	0.07	0.06	0.43	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	0.12	0.11	0.23	0.19	-	0.07	0.05	0.42	0.23

Images		Conifères					Feuillus				
		B	V	R	PIR	MIR	B	V	R	PIR	MIR
<i>Librairie ASTER -USGS</i>		0.06	0.08	0.05	0.51	0.24	0.06	0.09	0.06	0.55	0.31
<b>TM</b>	17-06-1984	0.04	0.06	0.04	0.32	0.15	0.05	0.07	0.04	0.42	0.18
	25-07-1992	0.05	0.06	0.04	0.34	0.13	0.05	0.07	0.04	0.43	0.16
	18-06-1996	0.04	0.06	0.04	0.34	0.14	0.04	0.06	0.04	0.44	0.17
	27-08-1998	0.03	0.05	0.03	0.31	0.12	0.03	0.05	0.03	0.40	0.15
	27-06-2005	0.04	0.05	0.03	0.35	0.14	0.04	0.06	0.03	0.44	0.17
<b>ETM+</b>	08-06-2001	0.03	0.05	0.03	0.35	0.14	0.03	0.06	0.04	0.45	0.17
	11-08-2001	0.02	0.05	0.02	0.32	0.13	0.02	0.05	0.03	0.40	0.16
<b>HRV</b>	01-08-1987	-	0.05	0.03	0.33	-	-	0.05	0.03	0.39	-
<b>HRG</b>	29-07-2006	-	0.04	0.03	0.33	0.15	-	0.05	0.03	0.40	0.18

## VIII-4 Comparaison des réflectances au sol avec des mesures de spectroradiomètre ASD

### *Pour des champs agricoles*

Nous disposons une série de mesures *in situ* de réflectance réalisées avec le spectroradiomètre « FieldSpec HH pro » d'ASD par le CRDH dans des champs agricoles en concomitance avec l'acquisition des images satellitales (tableau VIII-8). Les figures VIII-5 et VIII-6 montrent respectivement les réflectances spectrales au sol ainsi que la localisation des pixels des images Landsat-7 ETM+ acquises les 05-06-2000, 26-07-2001, 11-08-2001 et 14-08-2002. Ces images présentent des conditions atmosphériques très différentes (figure VIII-6). La comparaison des réflectances mesurées et estimées à l'aide de REFLECT (figure VIII-7) montre que les estimations sont passablement dispersées par rapport aux mesures avec des erreurs moyennes absolues de 0.012 dans la bande bleue, 0.014 dans le vert, 0.019 dans le rouge et 0.046 dans le PIR, ce qui correspond à un peu plus de 10% d'erreur relative. Ces écarts sont probablement dus à la différence de la résolution de mesure ASD (1 m circulaire) et ETM+ (30 m x 30 m). Dans le cas de l'image du 05-06-2000, une surestimation systématique est observée probablement à cause de la présence d'une fine couche nuageuse qui se manifeste par un effet additif élevé dans toutes les bandes spectrales (diffusion non sélective). Si on augmente l'AOD pour corriger l'effet additif des bandes bleue et verte, la réflectance PIR est augmentée car les transmittances ( $T^{\downarrow}$  et  $T^{\uparrow}$ ) sont réduites sans que la réflectance atmosphérique ( $\rho_{atm}$ ) ne soit augmentée. En d'autres mots, la modélisation de la diffusion par la théorie de Mie ne s'applique pas à la diffusion non sélective.

Tableau VIII-8. Lieux des mesures de la réflectance (avec un spectroradiomètre ASD) réalisées par le CRDH dans des champs agricoles.

<b>Images</b>	<b>Lieu</b>	<b>Culture et nombre de points de mesure</b>
05-06-2000	St-Hilaire, Québec	Pois (3 points)
26-07-2001	L'Acadie, Québec	Haricot (5 points), maïs sucré (4 points)
11-08-2001	L'Acadie, Québec	Maïs sucré (4 points)
14-08-2002	Rougemont, Québec	Maïs sucré (12 points)

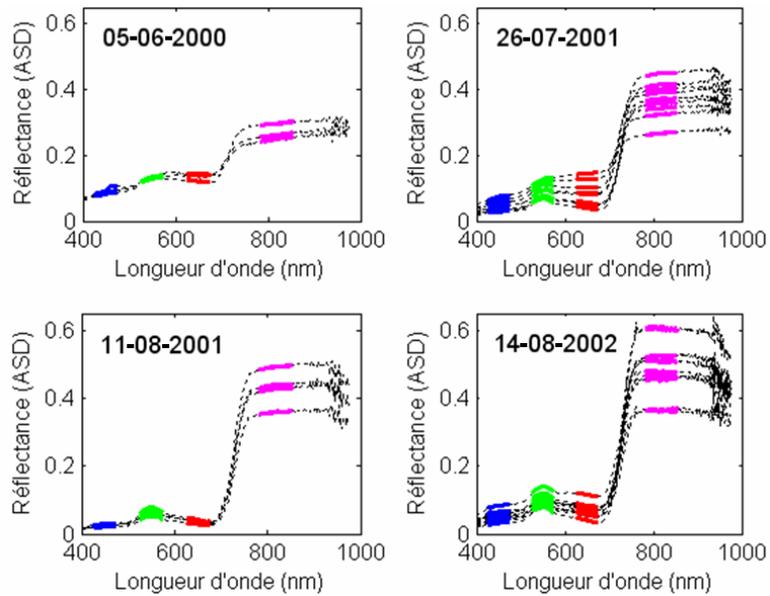


Figure VIII-5. Réflectances spectrales des points de mesure par spectroradiomètre ASD dans les champs agricoles indiqués dans le tableau VIII-8. Les bandes spectrales bleue, verte, rouge et PIR de ETM+ sont indiquées par des traits bleus, verts, rouges et mauves, respectivement.

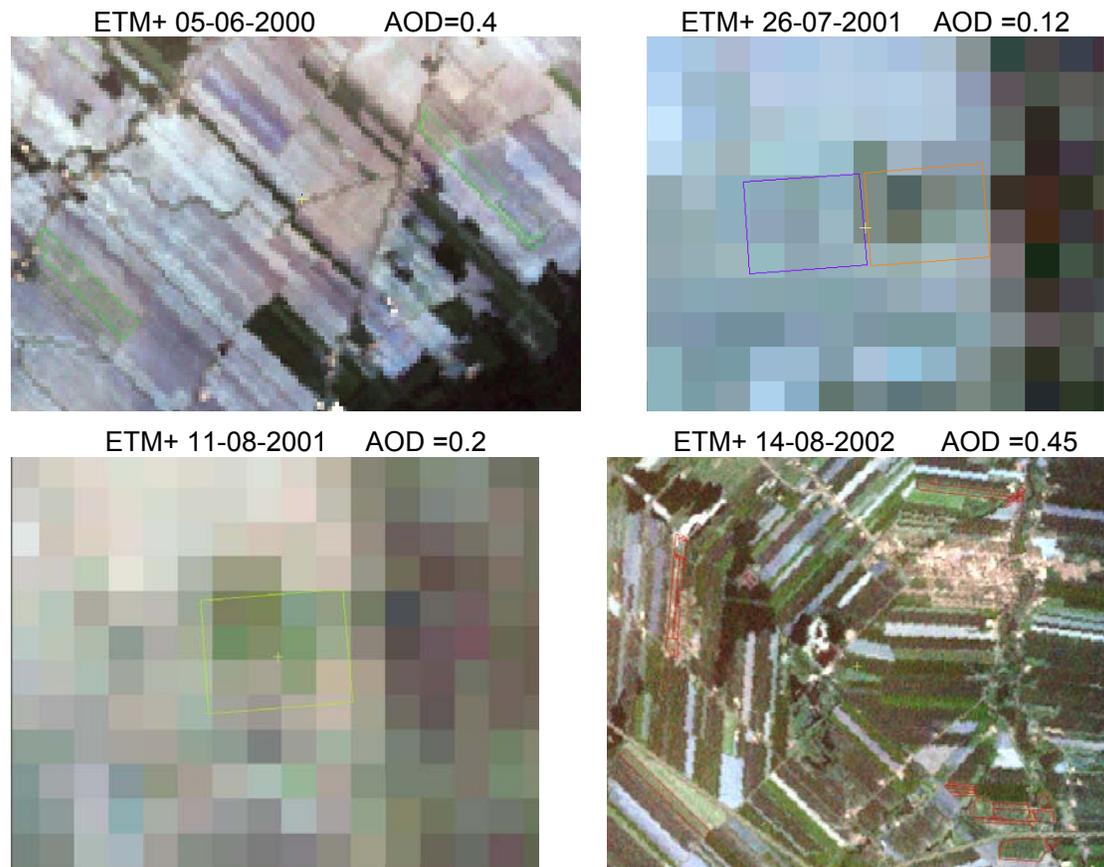


Figure VIII-6. Localisation sur les images Landsat-7 ETM+ des parcelles dans lesquels les mesures ASD ont été réalisées (voir tableau II-3 pour les coordonnées des parcelles).

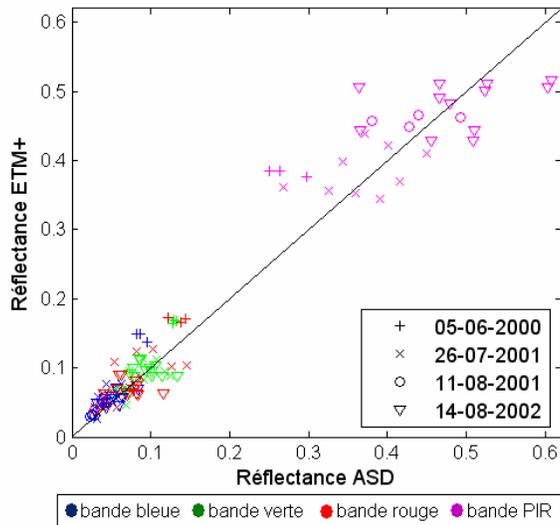


Figure VIII-7. Comparaison des réflectances estimées par REFLECT à partir des images Landsat-7 ETM+ avec les mesures (ASD) réalisées au moment du passage du satellite.

Dans un travail précédent réalisé avec la première version de REFLECT et avec les mêmes bases de données (Bouroubi *et al.* 2006), nous avons trouvé que l'erreur relative absolue ( $|\text{estimation-mesure}|/\text{mesure}$ ) sur l'ensemble des pixels (toutes les images confondues) était de 30 % pour la réflectance rouge, 25 % pour la réflectance PIR et de 20 % pour le NDVI. Les erreurs étaient moins importantes pour l'image ALI. Nous pensions que ceci était dû au fait que la bande PIR de ALI n'est pas affectée par l'absorption de la vapeur d'eau. Les résultats obtenus avec la nouvelle version de REFLECT (présentés ci-haut) montrent qu'une nette amélioration a été apportée au logiciel.

### ***Pour une cible brillante***

Une cible brillante (toit d'une bâtisse) identifiée dans la région de St-Jean-Sur-Richelieu (figure VIII-8-a) est utilisée pour vérifier la correction de l'effet multiplicatif (transmittances d'absorption gazeuse et transmittances de diffusion par les gaz et les aérosols). Des mesures de réflectance spectrale ont été réalisées (à l'aide d'un ASD) sur les différents matériaux qui constituent le toit (voir figure VIII-8-b). La réflectance spectrale globale du toit est obtenue en calculant la moyenne des réflectances de ses matériaux pondérée par la surface occupée par chaque matériau. L'intégration des réflectances spectrales par bande se fait en tenant compte de la sensibilité spectrale de chacune des bandes des capteurs utilisés (ETM+ et ALI) et de l'éclairement solaire spectral (comme indiqué par l'équation 4 au chapitre II).

Une légère sous-estimation est observée pour certaines images, l'erreur absolue moyenne par bande est de 0.042, 0.027, 0.0221 et 0.023 dans les bandes bleue, verte, rouge et PIR, respectivement. Ces valeurs sont relativement faibles (un peu plus de 5%) par rapport aux réflectances de la cible.

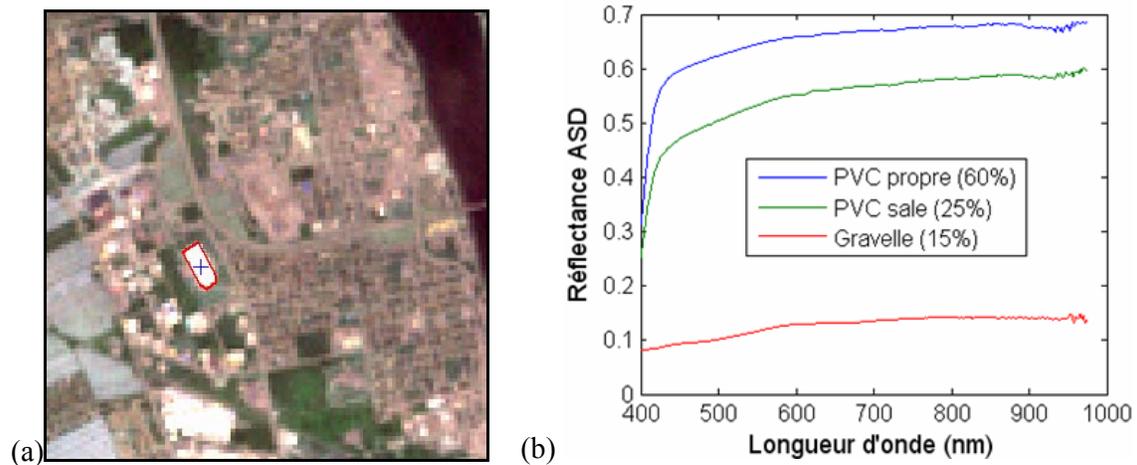


Figure VIII-8. Localisation et réflectance spectrale mesurée (le 17 juin 2003 par ASD) du toit de la bâtisse de Québec située à St-Jean-Sur-Richelieu (45° 19' 36" N; 73° 17' 17" O). Trois types de surfaces ont été identifiées sur le toit : du PVC propre (60% de la surface), du PVC sale (25% de la surface) et de la gravelle (15% de la surface).

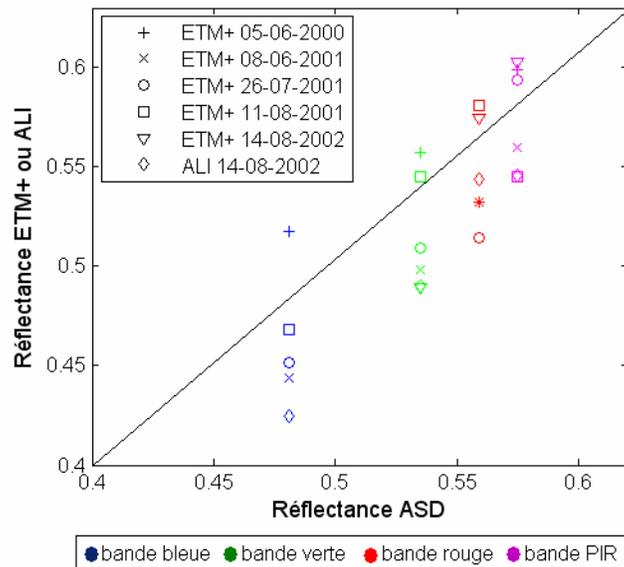


Figure VIII-9. Comparaison des réflectances estimées par REFLECT à partir de cinq images Landsat-7 ETM+ et une image EO-1 ALI avec les mesures ASD pour le toit brillant de la bâtisse de Québec de St-Jean-Sur-Richelieu, Québec.

# CHAPITRE IX - Intégration des corrections topographiques et validation

## IX-1 Introduction

Tel que présenté dans le chapitre III (formulation), la généralisation de la formulation du 6S pour introduire un terrain à relief variable est la suivante (équation 9, section III-2) :

$$\rho^{sat} = T_{gaz} \left( \rho_{atm} + \frac{t_{dir}^{\downarrow} \frac{\cos i_s}{\cos \theta_s} \rho_B t_{dir}^{\uparrow} + t_{diff}^{\downarrow} g_{ciel} \rho_{HD} t_{dir}^{\uparrow} + \bar{T}^{\downarrow} t_{diff}^{\uparrow} \bar{\rho}_{env}}{1 - S_{alb} \bar{\rho}_{env}} \right)$$

Dans ce qui suit, nous examinerons en premier lieu l'état des choses pour conclure sur la formulation à retenir dans le cas du logiciel REFLECT. Cette formulation sera validée par la suite avec des images satellitales réelles.

## IX-1 Revue de littérature

### a- Modélisation tenant compte uniquement de l'éclairement solaire direct

Cette hypothèse simplificatrice permet d'écrire l'équation (9) comme suit :

$$\rho^{sat} = T_{gaz} \left( \rho_{atm} + t_{dir}^{\downarrow} \frac{\cos i_s}{\cos \theta_s} \rho_B t_{dir}^{\uparrow} \right) \quad (30)$$

Une formulation analogue tenant compte des luminances (non normalisées à la manière du 6S) a été très utilisée dans les toutes premières études des effets topographiques sur les images satellitales, parfois en ignorant complètement les effets atmosphériques (Justice et Holben, 1979; Holben et Justice 1980; Smith *et al.* 1980; Teillet *et al.* 1982; entre autres). L'accent était alors mis sur la modélisation du facteur de réflectance bidirectionnelle. Différents modèles impliquant les angles d'incidence  $i_s$  et d'exitance (visée)  $i_v$  tels que modulés par le relief topographique ont été proposés, Dans la majorité de cas, cette réflectance était écrite :

$$\rho_B = \rho_0 \xi(i_s, i_v) \quad (31)$$

où  $\rho_0$  représente la réflectance de l'objet situé sur une surface horizontale vu et éclairé dans la direction de la verticale au sol et  $\xi(i_s, i_v)$  une fonction qui implique les angles d'incidence et d'exitance du rayonnement définis par rapport à la normale au sol (voir figure IX-1). Ces angles sont calculés par les formules bien connues :

$$\cos i_s = \cos \theta_s \cos \beta + \sin \theta_s \sin \beta \cos(\varphi_s - \alpha) \quad (32-a)$$

$$\cos i_v = \cos \theta_v \cos \beta + \sin \theta_v \sin \beta \cos(\varphi_v - \alpha) \quad (32-b)$$

Les angles  $\beta$  et  $\alpha$  sont respectivement la pente et l'orientation de la surface inclinée. Pour une visée du nadir l'angle d'exitance est égal à la pente du terrain.

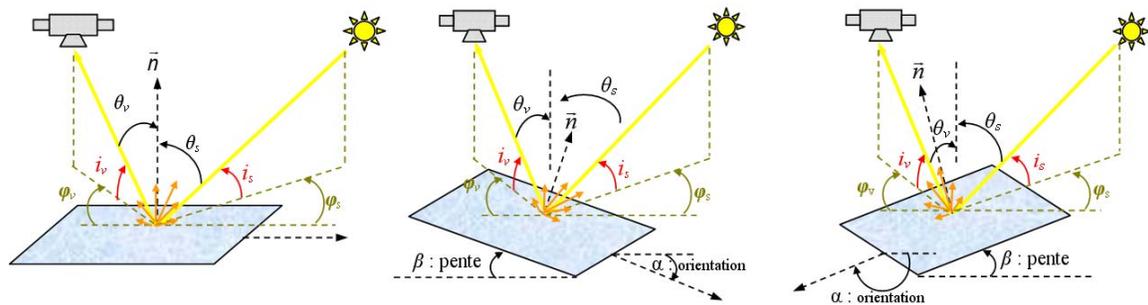


Figure IX-1. Éclairage et observation d'une surface plane et d'une surface inclinée orientée vers ou à l'opposé du soleil.

Le tableau IX-1 donne quelques exemples des fonctions  $\xi(i_s, i_v)$  souvent utilisées. Le coefficient de modulation  $k$  des modèles anisotropiques est à définir empiriquement.

Tableau IX-1 : Modèles du facteur de réflectance bidirectionnelle.

Modèle	$\xi(i_s, i_v)$
Isotrope	Constante, égale à 1
Isotrope modulé	$(\cos i_s)^k$ ; pour $k=1$ , modèle isotrope
Minnaert	$(\cos i_s)^k (\cos i_v)^k$ ; pour $k=1$ , modèle isotrope

La vérification de ces modèles a été réalisée surtout en territoire forestier mais aucun n'a donné des résultats satisfaisants pour l'ensemble des conditions de pente et d'orientation du terrain. Le modèle simple lambertien (où juste la variation de l'éclairage direct par la topographie intervient) surestime les réflectances des objets dans les pentes à l'opposé du

soleil (Kawata *et al.* 1988 ; Riaño *et al.* 2003) tandis que les modèles anisotropiques sont difficiles à appliquer dans les cas pratiques. Ces derniers nécessitent des ajustements différents de leur coefficient de modulation  $k$  en fonction des intervalles de pentes et/ou d'orientations et selon le type d'objet observé (ex. peuplements des conifères v.s. peuplements des feuillus). Certaines études ont constaté que des résultats équivalents à ceux des modèles anisotropiques sont obtenus en exprimant la réflectance d'un terrain incliné comme suit (C-correction, Teillet *et al.* 1982) :

$$\rho_{Inc} = \rho_{Horiz} \frac{\cos i_s + c}{\cos \theta_s + c} \quad (33)$$

Le coefficient «  $c$  » est défini empiriquement.

Plus récemment, d'autres chercheurs ont proposé des formulations similaires dont certaines y introduisent aussi l'angle d'existance du rayonnement (Civco, 1989; Soenen *et al.* 2005; Gu et Gillespie, 1998). Soenen *et al.* (2005) soulignent que pour les forêts, les corrections topographiques basées sur la géométrie soleil-canopée-capteur sont plus appropriées que celles basées sur la pente du terrain vu la nature géotropique des arbres indépendamment de la pente ou de l'angle d'illumination.

## **b- Modélisation en ignorant les effets de l'environnement du pixel**

Cette hypothèse simplificatrice permet d'écrire l'équation (9) comme suit :

$$\rho^{sat} = T_{gaz} \left( \rho_{atm} + t_{dir}^{\downarrow} \frac{\cos i_s}{\cos \theta_s} \rho_B t_{dir}^{\uparrow} + t_{diff}^{\downarrow} g_{ciel} \rho_{HD} t_{dir}^{\uparrow} \right) \quad (34)$$

Cette formulation a été introduite par plusieurs auteurs (Sjoberg et Horn, 1983; Cavayas *et al.* 1984; Cavayas, 1987; Proy *et al.* 1989; Richter 1997) pour deux raisons principales : a) lorsque le pixel se trouve dans l'ombre, le rayonnement diffus du ciel devient la source principale d'illumination et b) la présence de ce rayonnement compense la perte de l'intensité de l'éclairement direct du soleil pour des pentes orientées à l'opposée du soleil. Selon ces auteurs, ceci cause la surestimation des réflectances en utilisant le modèle isotrope ou rend impossible de trouver un seul facteur de modulation  $k$  dans les cas des modèles anisotropes.

Deux paramètres sont à définir dans l'équation (34). Le facteur  $g_{ciel}$  peut être modélisé de différentes façons selon la caractérisation de l'éclairement diffus du ciel comme isotrope ou

anisotrope (voir par exemple Loutzenhiser *et al.* 2007, pour une revue de plusieurs modèles). Le tableau IX-2 montre quelques modèles introduits dans les études en télédétection (Cavayas, 1987 ; Sandmeier et Klaus, 1997; Shepherd et Dymond, 2003; Richter ,1997 et 2004). Le modèle de Temps et Coulson (1977) ainsi que celui de Hay et Davies (1980) sont les modèles les plus élaborés selon Mefti *et al.* (2003).

Tableau IX-2. Modèles de composante diffuse du rayonnement solaire reçue sur plan incliné.

Modèle/Auteur	Modèle pour $g_{ciel}$	Type de rayonnement diffus
Liu et Jordan (1963)	$\frac{1 + \cos \beta}{2}$	Isotropique
Temps et Coulson (1977)	$\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \left(1 + \sin^3 \frac{\beta}{2}\right) (1 + \cos^2 i_s \sin^3 \theta_s)$	Anisotropique : le rayonnement est composé d'une partie diffuse (1 <sup>er</sup> terme), d'une partie provenant de l'horizon (2 <sup>e</sup> terme) et d'une partie provenant de la zone circumsolaire
Hay et Davies (1980)	$A \cos i_s + (1 - A) \frac{1 + \cos \beta}{2}$ <i>A</i> : indice d'anisotropie représentant la transmittance atmosphérique directe du rayonnement solaire	Anisotropique : le rayonnement est composé d'une partie provenant de la zone circumsolaire (1 <sup>er</sup> terme) et d'une partie diffuse (2 <sup>e</sup> terme)

Concernant le facteur de réflectance hémisphérique directionnelle, dans la plupart des cas, elle est supposée lambertienne et égale à la réflectance  $\rho_0$  de l'équation (31).

### c- Modélisation tenant compte de l'ensemble des effets

Peu d'études effectuées dans le domaine des corrections des effets topographiques ont tenu compte de l'ensemble des phénomènes incluant l'effet d'adjacence ou les réflexions multiples entre l'environnement et l'atmosphère. Dans le cas des terrains rugueux, ces effets peuvent être importants à cause de l'inclinaison des surfaces environnant la cible, notamment dans les cas de réflexions mutuelles entre les versants opposés. D'autre part, la topographie environnante peut masquer le disque solaire et obstruer une partie du firmament. Dans certaines études, le MNA est utilisé pour déterminer « des facteurs de visibilité » des surfaces environnantes par un pixel donné afin de tenir compte des réflexions directes de l'environnement vers la cible, ainsi que « des facteurs d'obstruction » pour localiser les pixels dans l'ombre ainsi que des parties du ciel obstruées par la topographie. Déjà en 1981, Kimes et Kirchner par des études de simulation démontraient que les effets de réflexion mutuelle

commencent à devenir importants pour des versants avec des pentes plus grandes que 30° et pour des couvertures de surface de forte réflectivité. Ainsi, ces effets peuvent être ignorés dans une première approximation.

Concernant les effets d'adjacence, le problème est de savoir comment évaluer le rayonnement total incident à l'environnement ainsi que sa réflectance qui sont à leur tour influencés par la topographie. Opérer pixel par pixel, comme nous l'avons proposé pour les terrains horizontaux pose des problèmes importants sur le plan de la vitesse de calcul pour l'ensemble de l'image. En première approximation, nous pouvons employer la même procédure que dans le cas d'un terrain horizontal.

#### d- Les effets de la position du capteur

Dès que la visée du satellite est hors nadir, l'angle de visée doit être considéré, que ce soit pour des surfaces horizontales ou inclinées (phénomènes d'anisotropie de la réflectance). Pour ces dernières, l'incidence de visée est calculée tenant compte de la courbure de la terre par le modèle en combinant les équations 32-b (incidence de visée sur surface inclinée) et 12 (ajustement dû à la courbure de la terre). Ces effets n'ont pas été étudiés dans cette recherche.

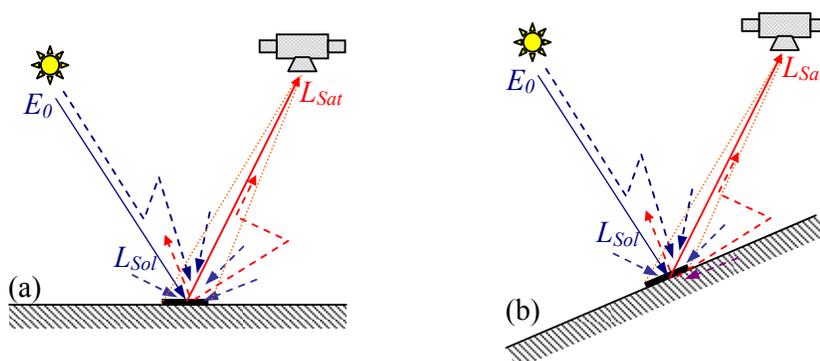


Figure IX-2. Observation satellitaire d'une cible en terrain horizontal et en terrain incliné.

### IX-3 Modèles intégrés dans le logiciel REFLECT

Nous avons intégré dans le logiciel REFLECT le modèle lambertien (sans référence à la FDRB) avec séparation des composantes directes et diffuses. Les effets de l'environnement ont été pris en compte en supposant un terrain environnant horizontal (d'où les notations  $\rho_{env}^H$

et  $T_H^\downarrow$  dans l'équation 35). Le modèle de Temps et Coulson (1971), tel que suggéré par Cavayas (1987), a été utilisé pour tenir compte des variations du rayonnement diffus (voir figure IX-1). Ainsi, le calcul des réflectance au sol dans REFLECT est réalisé par l'inversion de l'équation 35 :

$$\rho^{sat} = T_{gaz} \left( \rho_{atm} + \frac{\rho_{sol} \left( t_{dir}^\downarrow \frac{\cos i}{\cos \theta_s} t_{dir}^\uparrow + t_{diff}^\downarrow g_{ciel} t_{dir}^\uparrow \right) + T_H^\downarrow t_{diff}^\uparrow \rho_{env}^H}{1 - S_{alb} \rho_{env}^H} \right) \quad (35)$$

avec  $g_{ciel}$  défini comme dans le modèle de Temps et Coulson (Tableau IX-2) par :

$$g_{ciel} = \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \times \left( 1 + \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) \times \left( 1 + \cos^2 i_s \sin^3 \theta_s \right) \quad (36)$$

## IX-4 Validation

Pour la validation de la formulation des corrections topographiques dans le logiciel REFLECT, nous avons décidé de faire deux tests, un premier dans le cas des plans inclinés lisses (toitures des bâtiments) en haute latitude Nord et un second dans le cas d'un terrain montagneux en haute altitude. Dans le premier cas, le choix des hautes latitudes favorise un soleil bas à l'horizon tandis que les effets atmosphériques sont réduits au minimum compte tenu de la clarté de l'atmosphère. Le choix de la haute altitude dans le second cas permet aussi de minimiser l'incidence des particules d'aérosols plutôt rares à ces altitudes.

### V-2-1 Réflectances de plans inclinés lisses

Nous avons identifié sur une image Ikonos, datant du 29-08-2002 et couvrant une zone de la région de Paulatuk dans le territoire du Nord Ouest, des grands bâtiments avec des toitures inclinées et symétriques. Le soleil étant très bas, l'effet de la différence d'éclaircissement sur des deux cotés de la toiture est très prononcé (figure IX-3).



Figure IX-3. Image Ikonos de la région de Paulatuk, territoire du Nord Ouest, illustrant l'effet de la différence d'éclairage sur des toitures inclinées. Centre de la scène 69° 20' 30" N, 124° 04' 00" O; angle zénithal solaire 60.06°; azimut solaire 182.75°; angle de visée 25.49°; azimut de visée = 287.78°; atmosphère claire (AOD=0.05).

Les pentes des toitures peuvent être évaluées approximativement (en ignorant la différence d'azimut entre le capteur et le plan) à partir du rapport des longueurs apparentes de chacune des demi-toitures au moyen d'un calcul trigonométrique simple (figure IX-4).

Le rapport entre la demi-toiture de grande largeur apparente et la demi-toiture de petite largeur

apparente vaut :  $\frac{A}{B} = \frac{L+d}{L-d} = k$  d'où  $d = L \frac{k-1}{k+1}$

De l'angle d'incidence de visée, on a :  $\tan(i_v) = \frac{d}{h}$  d'où :  $h = \frac{d}{\tan(i_v)}$

La pente de la toiture vaut :  $\tan(\beta) = \frac{h}{L} = \frac{d}{\tan(i_v)L} = \frac{L(k-1)/(k+1)}{\tan(i_v)L}$

Enfin :

$$\beta = \arctan\left(\frac{(k-1)}{(k+1)\tan(i_v)}\right) \quad (37)$$

L'angle  $i_v$  représente l'incidence de visée, il est calculée en tenant compte de la courbure de la terre par l'équation 12, on trouve  $i_v=28.44^\circ$ .

Pour les bâtiments 1, 2 et 3 (figure IX-3), les valeurs de  $k$  sont approximativement de 8/6, 7/5 et 4/2.5, respectivement. Ceci donne des pentes  $\beta$  de 15°, 18° et 24°, respectivement.

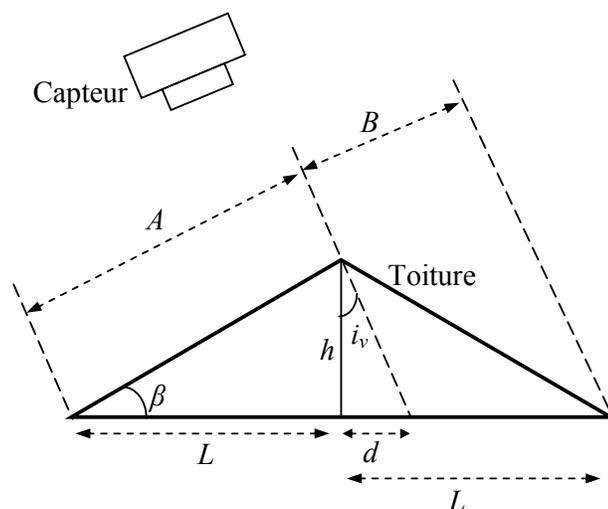


Figure IX-4. Principe de la déduction de la pente des toitures de la différence de largeur des demi-toitures due à la visée oblique du satellite Ikonos.

En considérant ces pentes avec les orientations des bâtiments, les paramètres d'éclairement (zénith solaire à 60.06°, azimut solaire de 182.75°) et de visée (incidence de visée de 28.44°), le modèle de corrections radiométriques avec et sans prise en compte des effets topographiques donne les résultats du tableau IX-3.

Tout d'abord, on peut constater sur ce tableau que les différences entre les VNs des faces claires et des faces sombres des trois bâtiments sont considérables. Il en est de même pour les réflectances au sol sans corrections topographiques. On peut voir également l'efficacité des corrections topographiques à retrouver des réflectances pratiquement identiques pour les deux faces d'un même bâtiment. Nous pouvons conclure ainsi que la méthode de correction topographique proposée par l'équation 34 fonctionne bien dans le cas de surfaces lisses, tout au moins pour un capteur ne se trouvant pas au point antisolaire (pas de phénomène de réflexion spéculaire observable).

Tableau IX-3. VNs numériques, réflectances au sol sans correction topographique (sur plans horizontaux) et avec correction topographique (sur plans inclinés) pour les deux faces claire et foncée des trois bâtiments de l'image Ikonos de Paulatuk.

	Bandes	Eau calme	Bâtiment 1		Bâtiment 2		Bâtiment 3	
			Face claire	Face foncée	Face claire	Face foncée	Face claire	Face foncée
	<i>Orientation(°)</i>	-	225	45	225	45	135	315
VN	Bleu	18	35	23	40	26	38	25
	Vert	12	26	17	31	18	33	17
	Rouge	6	16	10	22	10	25	11
Réflectance sur plans horizontaux	Bleu	0.021	0.166	0.065	0.2087	0.0903	0.192	0.082
	Vert	0.020	0.107	0.051	0.1377	0.0576	0.150	0.051
	Rouge	0.024	0.097	0.056	0.1377	0.0560	0.158	0.063
Réflectance sur plans inclinés	Bleu	-	0.123	0.109	0.152	0.141	0.144	0.145
	Vert	-	0.082	0.081	0.102	0.093	0.109	0.095
	Rouge	-	0.076	0.081	0.104	0.097	0.118	0.122

#### V-2-2 Réflectances de canopée forestière en terrains inclinés

Pour la validation des corrections topographiques en milieu forestier, nous disposons de trois images SPOT 1 (05-09-1988, 24-09-1989 et 03-09-1990) de la même scène du site français de Tarn (43° 39' N; 02° 42' E), très riche en relief (altitudes comprises entre 300 et 1200 m). La figure IX-5 illustre la scène des images SPOT 1, la carte (codée) des peuplements ainsi que la pente et l'orientation des pixels de l'image. Les codes d'identification des peuplements sont décrits sur le tableau IX-4.

La figure IX-6 illustre que la distribution des VNs de la bande PIR pour les faibles pentes (<8°) est peu affectée par l'orientation des pixels par rapport à l'azimut solaire. En revanche, pour les pentes supérieures à 18°, les surfaces orientées vers le soleil ont des VNs nettement plus élevés que ceux des surfaces de faibles pentes. Toutefois, les surfaces d'inclinaison supérieure à 18° et orientés à l'opposé du soleil (azimut solaire + 180°) ont des VNs à peine plus basses que les surfaces peu inclinées. Ainsi, en milieu forestier, l'importance de l'effet de la pente est différente selon l'orientation des surfaces par rapport au soleil. Cette constatation a également été rapportée par Ekstrand (1996).

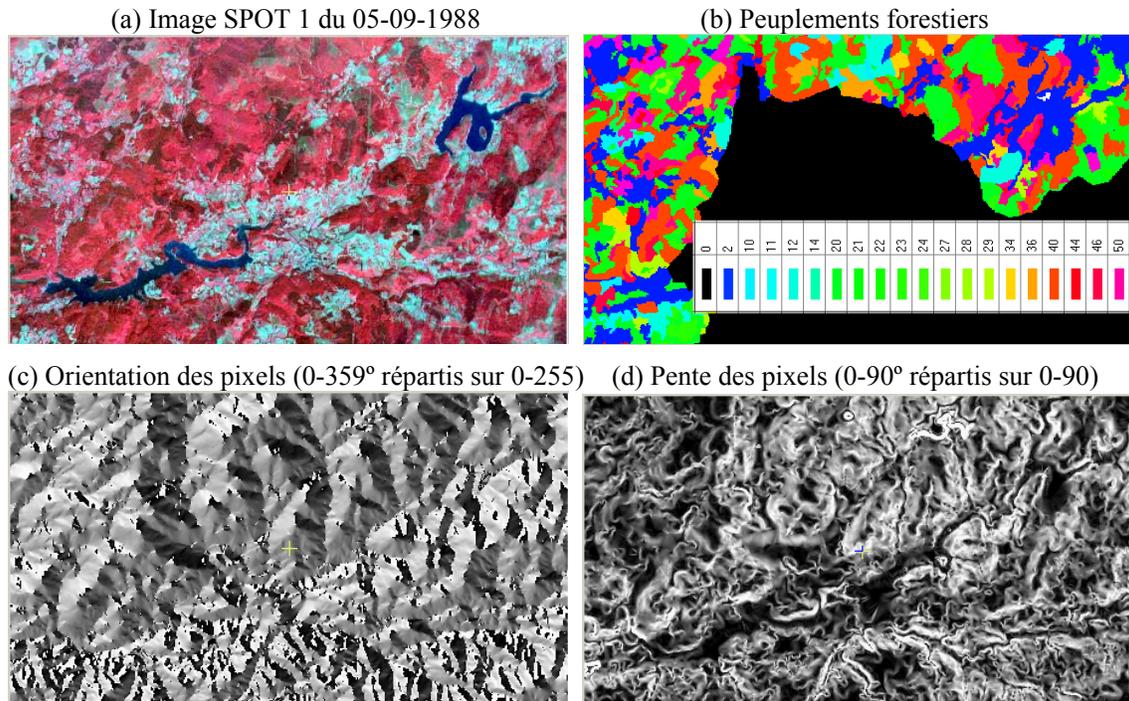


Figure IX-5. Données utilisées pour tester le modèle de correction topographique en milieu forestier. Site de Tarn, France (43° 39' N; 02° 42' E). Composé coloré dans (a) : PIR dans R; rouge dans V; vert dans B.

Tableau IX-4. Description des peuplements forestiers de la carte de la figure IV-5-b.

N° de classe	Désignation
0	Territoire hors zone
2	Futaie de chêne
10	Futaie de hêtre (moyen)
11	Futaie de hêtre (vieux)
12	Autres futaies feuillues
14	Futaie de sapin ou d'épicéa
20	Reboisement (moins 40 ans) sapin ou épicéa
21	Reboisement (moins 40 ans) douglas
22	Reboisement (moins 40 ans) d'autres conifères
23	Reboisement sapin ou épicéa (en bandes ou sous abri avec préparation feuillues)
24	Reboisement sapin ou épicéa (en bandes ou sous abri avec préparation conifères)
27	Reboisement (moins 40 ans) d'autres conifères en bandes (feuillue préparation)
28	Reboisement (moins 40 ans) d'autres conifères en bandes (conifère préparation)
29	Futaie de feuillues mêlée de taillis
34	Taillis de chêne
36	Taillis de hêtre
40	Autres taillis
44	Boisements morcelés de feuillus
46	Boisements lâches de feuillus
50	Non forestier

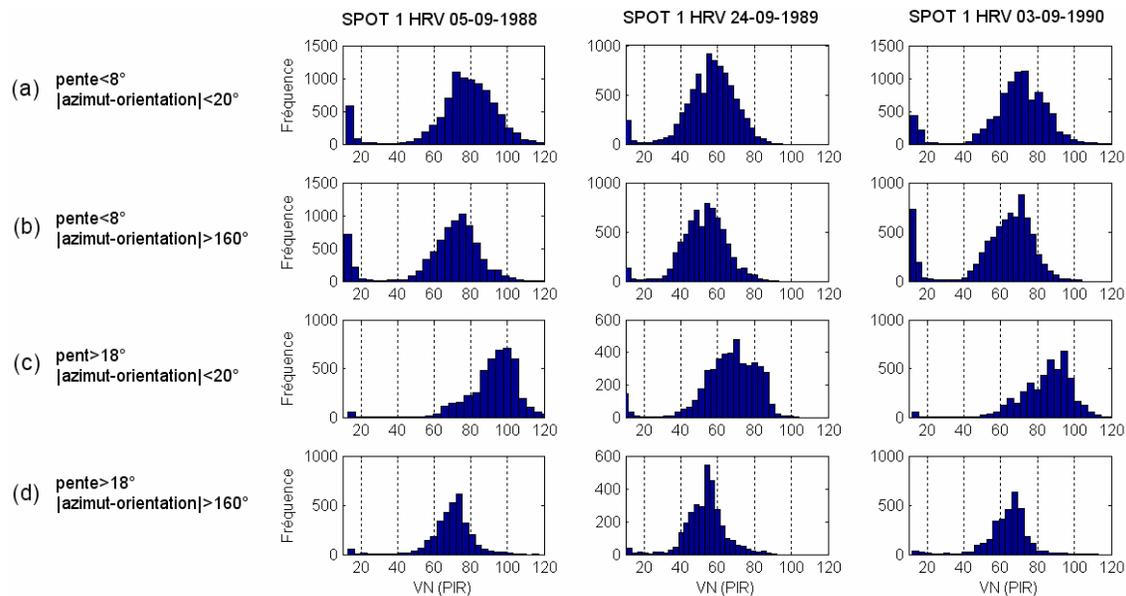


Figure IX-6. Effets topographiques sur la distribution des VN de la bande PIR pour les trois images SPOT 1 de Tarn, France. Les VN ont été classés en 4 catégories : (a) pente faible orientée vers le soleil, (b) pente faible orientée à l'opposé du soleil, (c) pente élevée orientée vers le soleil et (d) pente élevée orientée à l'opposé du soleil.

Les valeurs d'AOD ont été estimées par la méthode des cibles obscures sur les lacs de la scène. Elles sont de 0.05, 0.05 et 0.07 pour les images de 1988, 1989 et 1990, respectivement. Ces valeurs ont été utilisées pour les corrections atmosphériques.

Sur la figure IX-7, les VN (bande PIR) des différents peuplements sont comparés en fonction de l'année. Les effets de la différence des gains des capteurs ressortent dans les différences des VN, le gain du capteur était élevé lors de l'acquisition de l'image du 05-09-1988 (0.97244) et faible pour celle du 03-09-1990 (0.91347). Les images (bandes PIR) du 24-09-1989 et 03-09-1990 ont des gains identiques (0.91347), la différence des VN de ces deux images observée sur la figure IX-7 est due à la différence de l'angle zénithal du soleil qui est de  $38.04^\circ$  pour l'image de 1990 et de  $44.58^\circ$  pour l'image de 1989. Les différences entre les VN selon les peuplements ne ressortent pas clairement. Ainsi, sachant que dans la réalité les différents peuplements ont des réflectances différentes, on peut dire que les conditions radiométriques créent plus de variabilité dans les VN que les vraies réflectances des objets.

La figure IX-8 montre pour les trois années, les VN des différents peuplements selon quatre conditions d'éclairage. Pour les pentes faibles, l'effet de l'orientation de la surface est très bas. Pour les pentes plus prononcées, les surfaces orientées vers le soleil présentent des VN nettement plus élevées que les surfaces orientées dans la direction opposée du soleil.

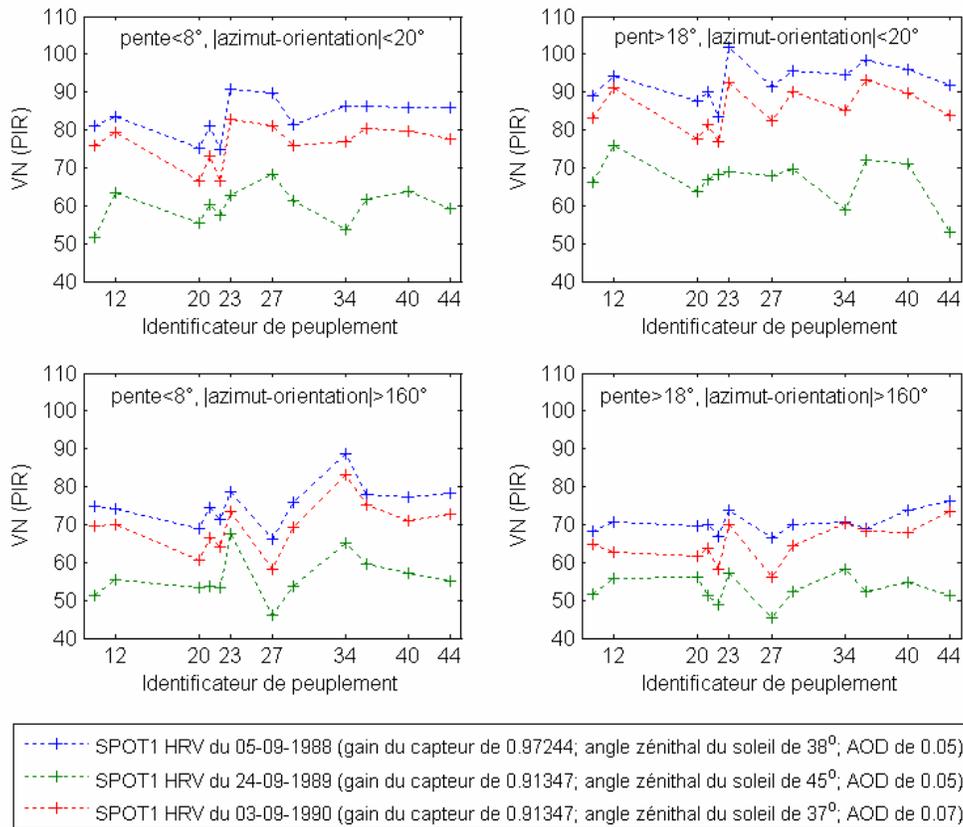


Figure IX-7. Comparaison des VN selon les dates : illustration des effets du gain du capteur et de l'angle zénithal du soleil (angle d'éclairement) dans la bande PIR des trois les images.

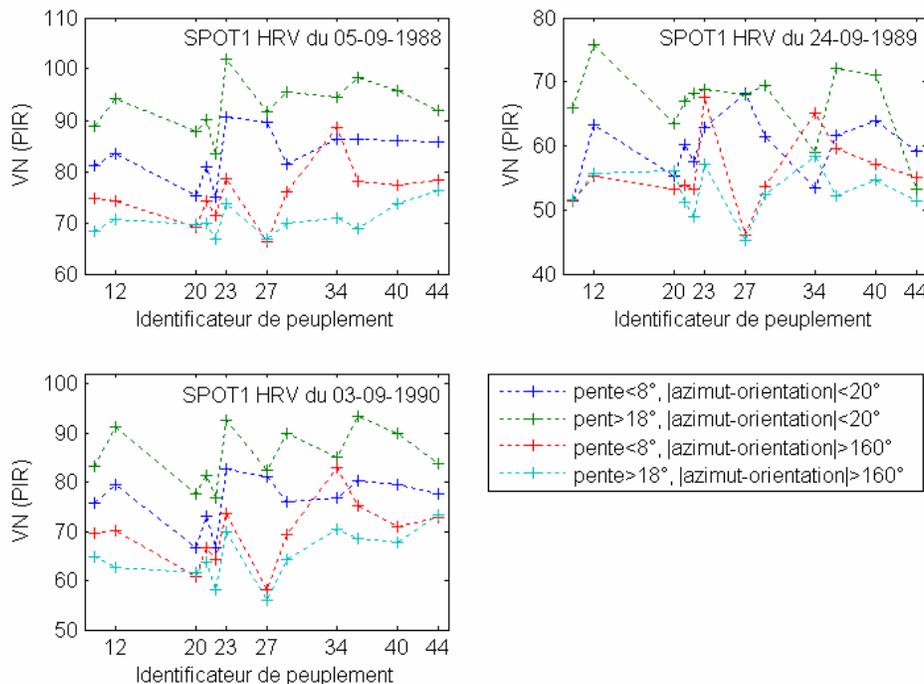


Figure IX-8. Comparaison des VN selon les conditions d'éclairement : illustration des effets topographiques sur la bande PIR des trois images.

Dans un premier temps, nous avons calculé à l'aide de REFLECT les réflectances au sol sans tenir compte des effets topographiques. La figure IX-9-a ci-bas montre à quel point les réflectances sont surestimées dans les terrains inclinés orientés vers le soleil. Les surfaces opposées au soleil ne montrent toutefois pas de sous-estimations importantes par rapport aux terrains plats. Ainsi, en appliquant la correction topographique du modèle que nous avons développé pour les surfaces inclinées lisses (équation 35 inversée), une forte surcorrection est obtenue pour les surfaces orientées au sens contraire de l'azimut solaire (figure IX-9-b).

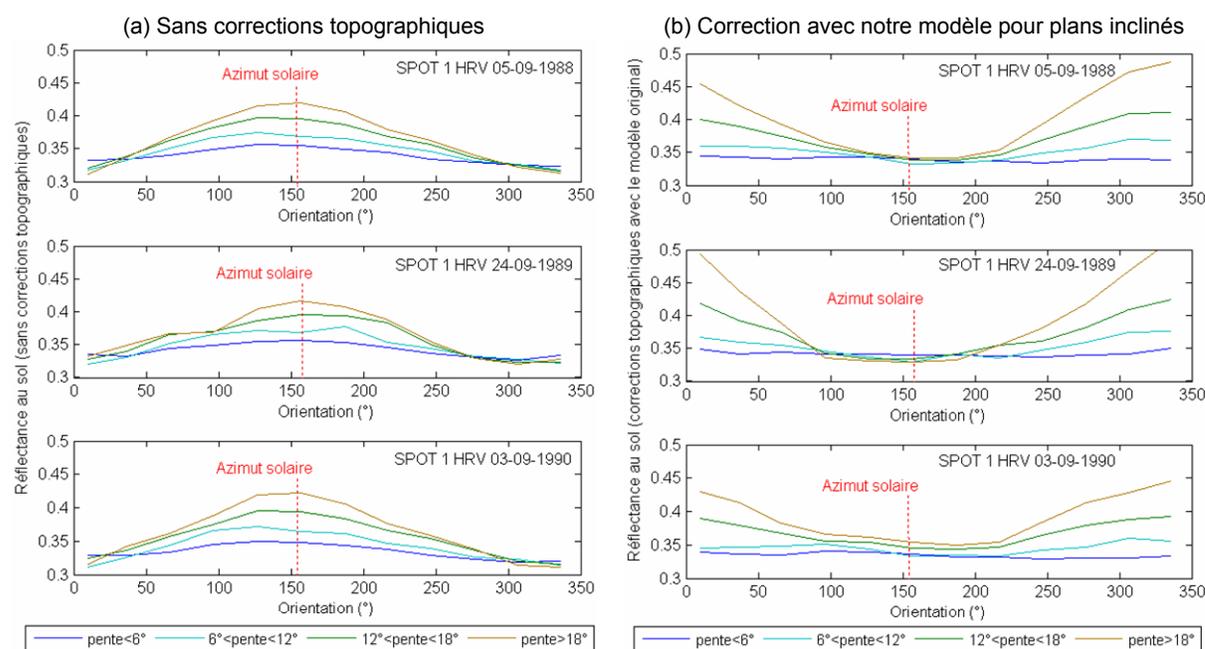


Figure IX-9. Réflectances au sol pour les 3 image SPOT 1 de Tarn, France, en fonction de la pente et de l'orientation des surfaces. Cas (a) sans corrections topographiques et (b) avec corrections topographiques par le modèle développé pour les surfaces planes.

### Particularité du milieu forestier - Proposition du principe de la pente équivalente

Le milieu forestier est caractérisé par la nature géotropique des arbres (Cavayas et Teillet, 1985) ce qui fait qu'un modèle développé pour des plans inclinés ne s'applique pas forcément à une canopée forestière. Ainsi, on s'attendrait à ce que la pente équivalente d'une canopée forestière soit plus faible que celle du terrain dans lequel elle se trouve. La canopée forestière est caractérisée par un autre phénomène : la quantité d'ombrages à l'intérieur de la canopée est variable selon la topographie (figure IX-10). Dans le cas des pentes exposées au soleil, la quantité d'ombrages est moins importante que dans le cas contraire. Nous proposons ainsi une correction de la pente qui dépend de l'orientation du pixel par rapport à l'azimut solaire.

$$\beta' = \kappa(\varphi_s - \alpha) \cdot \beta \quad (38)$$

La fonction  $\kappa(\varphi_s - \alpha)$ , toujours inférieure à 1, est déterminée par analyse des données issues des images SPOT. La différence  $\varphi_s - \alpha$  est notée  $\delta\varphi$  également.

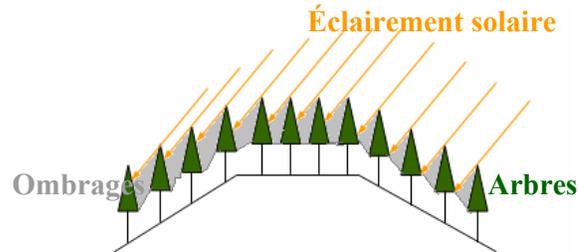


Figure IX-10. Représentation schématique des ombrages dans une canopée forestière située sur des terrains inclinés orientés vers et contre le soleil.

Afin de trouver la pente équivalente qui adapte le modèle proposé à la canopée forestière, nous avons recherché (en faisant varier de 1 à 0) le facteur multiplicatif  $\kappa$  qui minimise le RMSE entre la réflectance au sol des terrains inclinés (trois niveaux d'inclinaison :  $6^\circ < \beta < 12^\circ$ ,  $12^\circ < \beta < 18^\circ$  et  $\beta > 18^\circ$ ) et celles des terrains plats ( $\beta < 6^\circ$ ) et ce pour l'ensemble de la zone forestière des trois images SPOT 1 utilisées, tous peuplements confondus. Le tableau IX-5 donne les valeurs de  $\kappa$  pour les différentes valeurs de l'orientation des pixels. Pour les trois images utilisées. Ces valeurs dépendent de l'orientation mais pas de la pente.

Tableau IX-5. Coefficient  $\kappa$  (de l'équation 38) donnant la pente équivalente qui minimise le RMSE entre la réflectance au sol en terrains inclinés (de pente  $\beta$ ) et celle calculée en terrain plat, en fonction de la différence entre l'azimut solaire et l'orientation de la surface  $\delta\varphi$ .

$\delta\varphi$ (°)		-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	180
1988	$6^\circ < \beta < 12^\circ$	0.1	0.1	0.2	0.9	1	1	1	0.7	0.3	0.1	0	0.2
	$12^\circ < \beta < 18^\circ$	0.2	0	0.1	0.8	1	1	1	0.9	0.1	0.2	0	0.1
	$\beta > 18^\circ$	0	0	0.1	0.8	1	1	1	0.8	0.1	0	0.1	0.1
1989	$6^\circ < \beta < 12^\circ$	0.1	0.3	0.3	0.9	1	1	1	0.8	0.2	0	0.2	0.1
	$12^\circ < \beta < 18^\circ$	0.2	0.1	0.1	0.9	1	1	1	0.8	0.1	0.3	0	0
	$\beta > 18^\circ$	0	0	0.1	0.8	1	1	1	0.8	0.1	0	0.1	0.1
1990	$6^\circ < \beta < 12^\circ$	0.1	0.2	0.3	0.6	1	1	1	0.9	0.2	0.1	0	0.2
	$12^\circ < \beta < 18^\circ$	0.1	0	0.2	0.8	1	1	1	0.9	0.3	0.1	0	0.2
	$\beta > 18^\circ$	0.2	0	0.1	0.8	1	1	1	0.8	0.1	0	0.1	0.1

L'application de la correction topographique avec le modèle des pentes équivalentes donne de très bons résultats pour la bande PIR des images SPOT utilisées, l'erreur moyenne est de 0.02 unités de réflectance. Cette erreur est très faible par rapport à celle obtenue avec le modèle de

Minnaert (avec  $K=0.5$ , tel que recommandé par Murakami, 2002), souvent utilisé pour ce genre d'applications (Blesius et Weirich, 2005), qui donne une erreur de l'ordre de 0.1 unités de réflectances (figure IX-11 a et b). Il est à noter qu'une procédure spéciale a été rajoutée dans REFLECT pour effectuer les tests avec le modèle de Minnaert.

Dans la loi des pentes équivalentes (équation 38), les valeurs suggérées par le tableau IX-5 peuvent être lissées en fonction de la différence entre l'azimut solaire  $\varphi_s$  et l'orientation de la surface  $\alpha$ , notée  $\delta\varphi$ , par la fonction illustrée sur la figure IX-12 et donnée par :

$$\kappa(\delta\varphi) = 0.1 + 0.9 \left( 1 - \exp\left(\frac{-2\pi}{|\delta\varphi|}\right) \right)^{80} \quad (39)$$

Il reste à savoir si les coefficients de l'équation 39 (0.1 et 0.9) ont des valeurs de cet ordre de grandeur dans d'autres conditions (autres images, autres milieux forestiers, etc.).

Ainsi, la correction topographique dans le cas d'une canopée forestière se fait à l'aide de la même formulation validée pour des surfaces lisses (équation 35), dans laquelle la pente du terrain devra être plus faible (une pente équivalente), calculée à l'aide des équations 38 et 39.

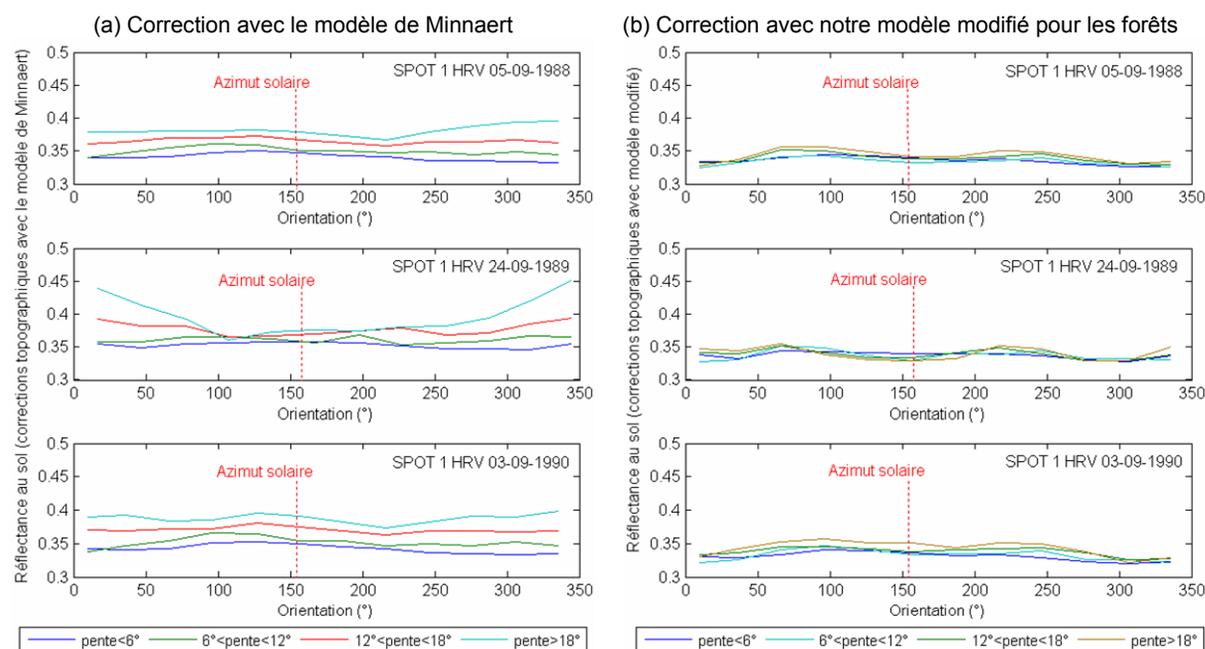


Figure IX-11. Réflectances au sol pour les 3 images SPOT 1 de Tarn, France, en fonction de la pente et de l'orientation des surfaces. Corrections topographiques par : (a) le modèle de Minnaert et (b) celui développé et modifié pour les forêts (modèle des pentes équivalentes).

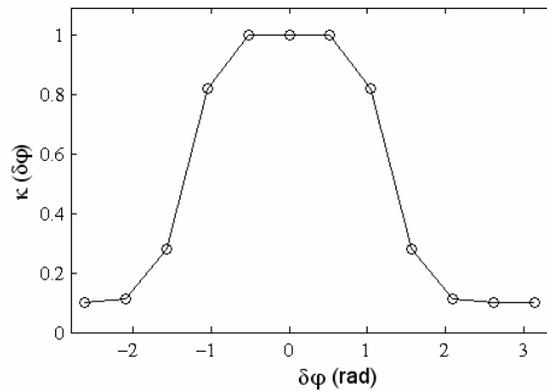


Figure IX-12. Coefficient multiplicatif ( $\kappa$ ) de calcul des pentes équivalentes pour la correction des effets topographiques affectant les canopées forestières, en fonction de la différence entre l'orientation du terrain et l'azimut solaire ( $\delta\phi$ ).

Nous pouvons voir sur la bande PIR de l'image du 05-09-1988 (figure IX-13), dans les zones encadrées, que les réflectances au sol des surfaces inclinées (pente élevée) et orientées vers le soleil ( $|\text{orientation-azimut}|$  faible) ont été homogénéisées par rapport aux valeurs numériques.

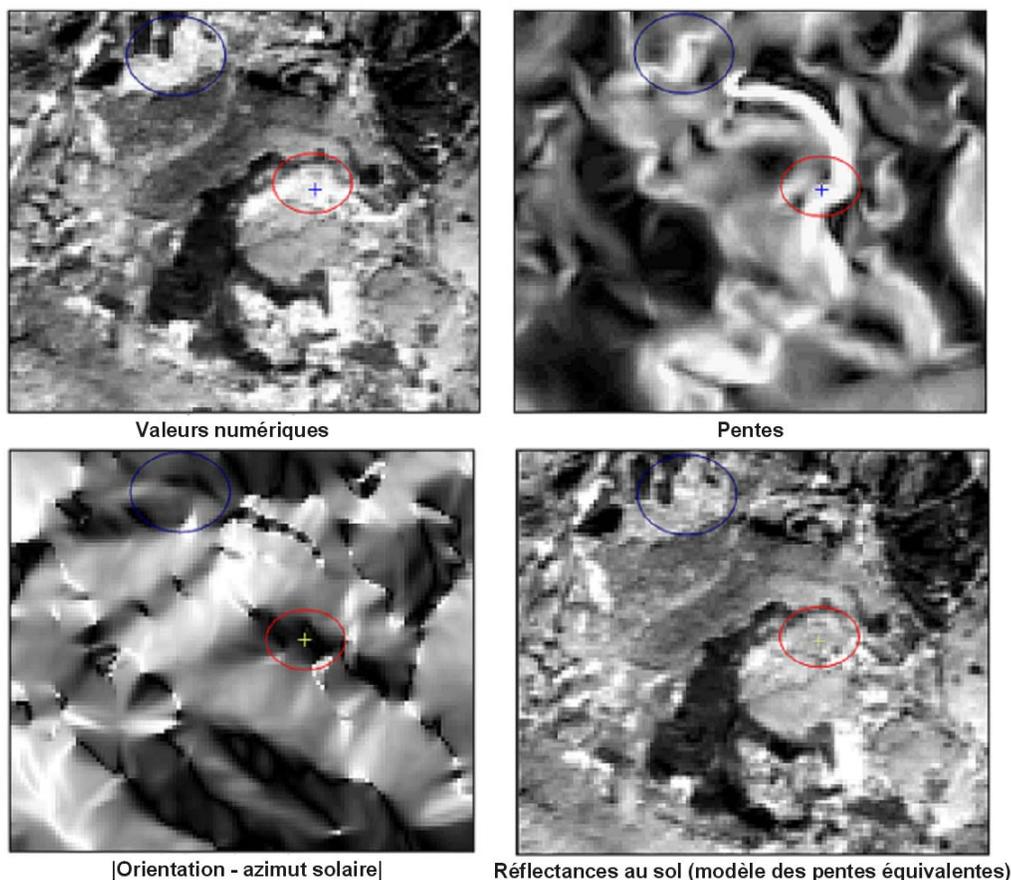


Figure IX-13. Exemples de réduction des effets topographiques par le modèle des pentes équivalentes sur la bande PIR de l'image SPOT 1 acquise le 05-09-1988 sur Tarn, France.

## **TROISIÈME PARTIE**

### **Influence des corrections atmosphériques et topographiques sur la qualité des informations extraites des images de télédétection**

# CHAPITRE X - Simulation des modifications de la signature spectrale des objets par l'atmosphère et la topographie

## X-1 Effets des conditions atmosphériques sur les signatures spectrales

Nous avons réalisé à l'aide du logiciel REFLECT le calcul des paramètres atmosphériques et ainsi la simulation des réflectances apparentes correspondant à des gammes de réflectances au sol et ce pour différentes conditions atmosphériques. Nous allons voir dans ce qui suit l'effet de trois intrants de l'algorithme REFLECT sur la relation  $\rho^{sat} - \rho_{sol}$  : l'AOD, l'altitude du lieu  $H$  et l'humidité relative de l'air  $H_r$ . La position du soleil (fixe) est choisie de manière à être représentative des conditions de la majorité des images utilisées pour le territoire étudié (saison d'été et milieu de journée :  $\theta_s=30^\circ$ ,  $\varphi_s=130^\circ$ ), le terrain est plat et la visée est du nadir. L'effet d'adjacence n'est pas inclus dans le calcul.

### X-1-1 L'épaisseur optique des aérosols

Puisque la majorité des bandes spectrales évitent les régions d'absorption gazeuses, les aérosols exercent l'effet atmosphérique le plus important sur la modification de la réflectance des objets dans les différentes bandes spectrales. Il se traduit par un effet additif ( $\rho_{atm}$ ) et un effet multiplicatif associé ( $T^\downarrow \cdot T^\uparrow$ ). Ces effets sont induits par la diffusion des aérosols dont l'importance est inversement proportionnelle à la longueur d'onde, comme le décrit la théorie de Lorenz-Mie (voir annexe 2). Ainsi, au niveau du satellite, les faibles réflectances sont surestimées (l'effet additif domine l'effet multiplicatif) et les réflectances élevées sous-estimées (l'effet multiplicatif dépasse l'effet additif). Les effets additifs et multiplicatifs se neutralisent pour des réflectances au sol moyennes (autour de 0.3). L'importance de ces effets dépend évidemment de la quantité et du type d'aérosols présents dans l'atmosphère (donc de l'AOD) et aussi de la bande spectrale (tableau X-1). Ainsi, la bande bleue subit fortement ces effets qui sont presque absents dans la bande MIR. La figure X-1 montre que dans la bande bleue, les faibles réflectances sont augmentées d'environ 0.1 si l'atmosphère est claire (AOD=0.05) et de presque 0.2 si elle est brumeuse (AOD=0.6). Dans cette bande les réflectances élevées ( $\rho_{sol}=0.5$ ) sont réduites de 10% et de 40% pour des valeurs d'AOD de 0.05 et de 0.6 respectivement. Pour les longueurs d'onde élevées de la gamme optique du

rayonnement solaire, i.e. la bande MIR, l'effet additif est pratiquement négligeable et l'effet multiplicatif se limite à environ 10% pour une atmosphère chargée en aérosols (AOD=0.6). La situation est intermédiaire pour les autres bandes spectrales considérées et les autres conditions atmosphériques. Notons que pour les besoins de l'exercice, nous avons choisi des bandes spectrales étroites afin de focaliser sur l'effet des aérosols et éviter celui de l'absorption gazeuse. Pour les capteurs réels, les bandes spectrales sont plus larges, surtout dans le PIR et le MIR, englobant des raies d'absorption gazeuses, notamment celle de H<sub>2</sub>O. Dans ce cas, les transmittances gazeuses (et les transmittances totales aussi) sont plus faibles que celles données dans le tableau X-1 et les erreurs de sous-estimation des réflectances élevées dans le PIR et le MIR sont encore plus grandes que celles indiquées ci-haut.

Tableau X-1. Effets additif et multiplicatif dans les bandes bleue, verte, rouge, PIR et MIR (450±15 nm, 550±20 nm, 650±20 nm, 850±25 nm et 1650±40 nm) pour quatre valeurs de l'AOD (0.05, 0.2, 0.4 et 0.6 correspondant à des ciels clair, moyen, brumeux et très brumeux, respectivement. Les autres facteurs sont fixés à :  $H = 100$  m,  $H_r = 40\%$ ,  $\theta_s = 30^\circ$  et  $\varphi_s = 130^\circ$ .

AOD	Effet additif ( $\rho_{atm}$ )					Effet multiplicatif ( $T_{tot} = T_{gaz} \cdot T^\downarrow \cdot T^\uparrow$ )				
	Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR	Bleu	Vert	Rouge	PIR	MIR
0.05	0.087	0.048	0.023	0.010	0.001	0.674	0.820	0.877	0.876	0.959
0.2	0.098	0.053	0.033	0.018	0.003	0.535	0.699	0.778	0.806	0.927
0.4	0.138	0.077	0.047	0.025	0.006	0.374	0.540	0.640	0.706	0.881
0.6	0.162	0.099	0.066	0.035	0.008	0.251	0.402	0.513	0.608	0.834

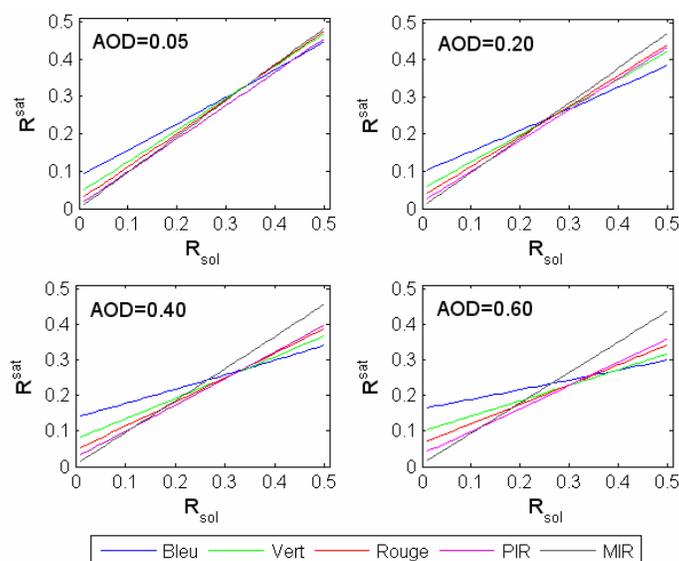


Figure X-1. Réflectance apparente ( $R^{sat}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{sol}$ ) pour les bandes bleue, verte, rouge, PIR et MIR (450±15 nm, 550±20 nm, 650±20 nm, 850±25 nm et 1650±40 nm) et quatre valeurs d'AOD. Les autres facteurs sont :  $H = 100$  m,  $H_r = 40\%$ ,  $\theta_s = 30^\circ$  et  $\varphi_s = 130^\circ$ .

## X-1-2 L'altitude du pixel

En examinant les courbes de la figure X-2, nous pouvons voir que l'intrant  $H$  devient important seulement si le terrain se trouve à une altitude élevée. Par exemple, à une hauteur de 1000 m, l'effet additif de la bande bleue est de 0.013 (en unités de réflectance) moins élevé par rapport au niveau de la mer et l'effet multiplicatif est également 7.5% moins important. Les écarts sont moins importants dans les autres bandes. Pour les altitudes très élevées (2000 m et plus), seule la bande bleue reste influencée par les conditions atmosphériques, et ce à cause de la diffusion de Rayleigh (un effet présent dans les 8-10 km les plus bas de l'atmosphère), vu que l'effet des aérosols est présent seulement dans les 2 km les plus bas de l'atmosphère (selon le choix établi dans le code 6S). Ainsi, si la scène contient des régions en altitude (plusieurs centaines de mètres), il est nécessaire de considérer le paramètre  $H$ . Si de plus l'écart entre les altitudes minimum et maximum de la scène est élevé, l'utilisation d'un MNA devient alors nécessaire.

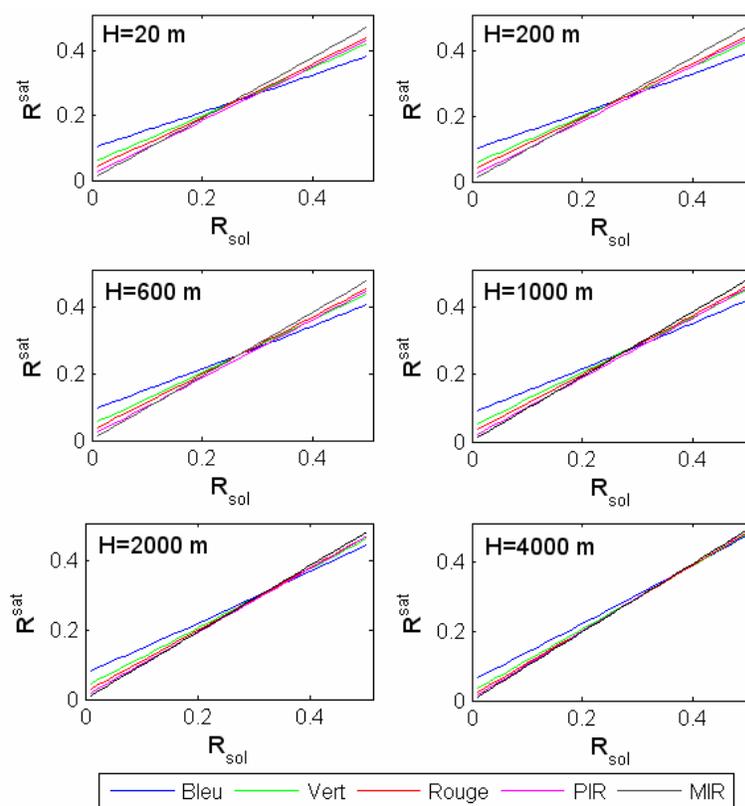


Figure X-2. Réflectance apparente ( $R^{sat}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{sol}$ ) pour les bandes spectrales bleue, verte, rouge, PIR et MIR ( $450\pm 15$  nm,  $550\pm 20$  nm,  $650\pm 20$  nm,  $850\pm 25$  nm et  $1650\pm 40$  nm) et pour six niveaux d'altitude  $H$ . L'AOD est fixé à 0.2 et  $H_r$  à 40%.

### X-1-3 L'humidité relative de l'air

L'effet du contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère, exprimé en terme d'humidité relative de l'air, agit uniquement dans les bandes PIR et MIR, qui englobent les raies d'absorption de H<sub>2</sub>O situées entre 800 et 840 nm et aux environs de 1600 nm (voir annexe 1). Ces raies d'absorption affectent les bandes PIR de tous les capteurs (notamment TM, ETM+, HRV, HRG, QuickBird, Ikonos, ASTER) à l'exception de EO-1 ALI qui dispose de deux bandes PIR conçues de manière à éviter les zones d'absorption de H<sub>2</sub>O (voir annexe 4). L'effet de la vapeur d'eau se traduit par une réduction de  $T_{\text{gaz}}$  qui diminue les réflectances élevées ( $\rho_{\text{sol}}=0.5$ ) de plus de 10% dans le PIR et le MIR, lorsque l'humidité relative de l'air passe de 20% à 80%. Ainsi, si ces bandes spectrales sont utilisées, ce qui est souvent le cas dans les applications d'observation du couvert végétal, il devient nécessaire de prendre en compte l'effet de la vapeur d'eau à travers les données d'humidité relative de l'air mesurées par une station météorologique ou du moins d'utiliser la valeur par défaut fixée à 2.93 g/cm<sup>2</sup> dans REFLECT (qu'on peut choisir dans le programme « Lut-Gaz »).

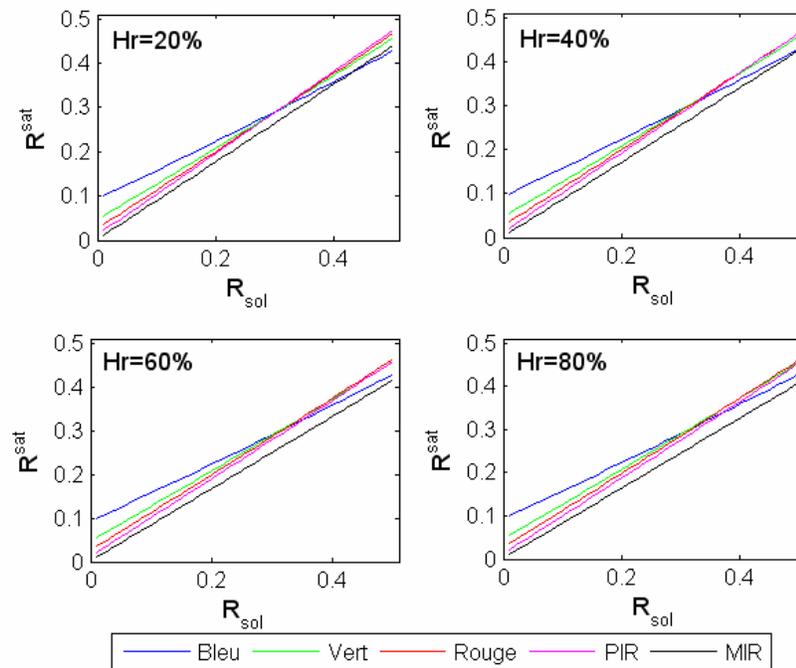


Figure X-3. Réflectance apparente ( $R^{\text{sat}}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{\text{sol}}$ ) pour les bandes spectrales bleue, verte, rouge, PIR et MIR (celles de ETM+) et pour quatre niveaux d'humidité relative de l'air. L'AOD est fixé à 0.2 et  $H$  à 100 m.

## X-1-4 Exemples de signatures spectrales

L'AOD étant le facteur atmosphérique qui affecte le plus la réflectance apparente, nous avons calculé les signatures spectrales de quelques surfaces/matériaux (conifère, feuillu, gazon, sol, tuiles) de la librairie ASTER de USGS telles qu'affectées par deux niveaux d'AOD. La figure X-4 montre à quel point une atmosphère brumeuse (AOD=0.5) peut affecter les réflectances apparentes des objets notamment dans les bandes bleue et verte où les effets additifs et multiplicatifs importants font confondre les faibles et les fortes réflectances. Même si  $H_r$  a été fixé à une valeur relativement faible (40%), les raies d'absorption de  $H_2O$ , notamment celles incluses dans les bandes PIR et MIR, affectent les réflectances apparentes.

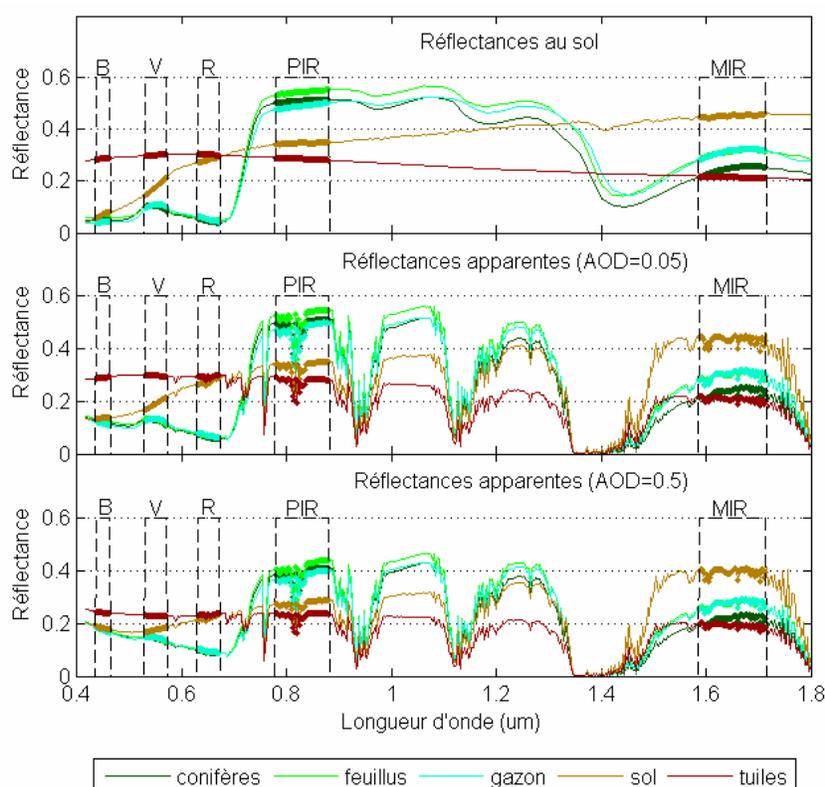


Figure X-4. Signatures spectrales de matériaux extraits de la librairie ASTER de USGS et leur modification par l'atmosphère pour deux valeurs de l'AOD (0.05 et 0.5).  $H_r$  est fixé à 40%.

## X-2 Simulation des effets topographiques sur les signatures spectrales

La simulation des effets topographiques se fait à l'aide du modèle de l'équation 35 (validé pour des surfaces lisses) pour une combinaison de trois valeurs de la pente (0, 30° et 60°) et trois valeurs de l'orientation du terrain (différence azimuth-orientation de 0, 90° ou 180°). Les

autres conditions sont fixées comme suit :  $AOD=0.2$ ,  $H_r=40\%$ ,  $H=100$  m,  $\theta_s=30^\circ$ ,  $\varphi_s=130^\circ$ , visée du nadir. Les conditions topographiques sont caractérisées essentiellement par l'angle d'incidence  $i_s$  des rayons solaires sur les surfaces inclinées. Donc, la combinaison pente-orientation de la surface fait que les rayons solaires sont soit davantage perpendiculaires ( $i_s$  proche de  $90^\circ$ ) soit davantage rasants ( $i_s$  proche de  $0$ ) à la surface inclinée par rapport à une surface horizontale. Dans le cas de la première situation, les réflectances apparentes seront surestimées alors que des sous-estimations importantes seront obtenues dans la seconde situation (figure X-5).

Toutefois, nous avons vu que le modèle utilisé pour ces simulations n'est valable que pour des surfaces lisses. Dans le cas des forêts, les sous-estimations de la réflectance au niveau du satellite ne sont pas aussi importantes. Vu que les arbres restent verticaux, la canopée forestière se comporte presque comme une surface horizontale, à l'exception du cas où les pentes sont orientées vers le soleil. Dans ce cas, les surestimations observées sont probablement dues aux ombrages moins importants.

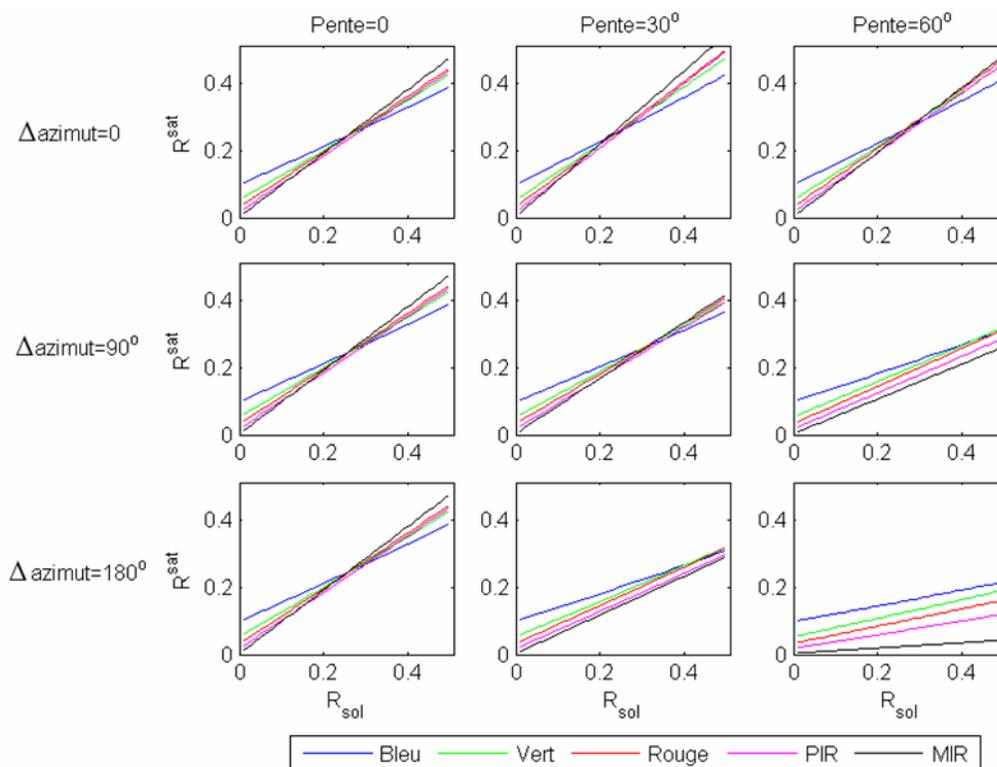


Figure X-5. Réflectance apparente ( $R^{sat}$ ) v.s. réflectance au sol ( $R_{sol}$ ) pour les bandes spectrales bleue, verte, rouge, PIR et MIR (celles de ETM+) et pour six conditions topographiques. L'AOD est fixé à 0.2,  $H$  à 100 m, l'angle zénithal du soleil à  $30^\circ$  et la visée est du nadir.

## **CHAPITRE XI - Effet de l'atmosphère sur les applications en milieu urbain : classification et suivi des changements**

Les applications de classification des images ou de détection des changements sont souvent basées sur la combinaison de plusieurs images (Jensen, 2000). L'objectif de ce chapitre est de montrer l'importance (ou non) de la restitution de la réflectance au sol pour les applications de classification et de détection des changements, avec comme perspective, la séparation des différents types d'occupation du sol (types de végétation, autres occupations du sol).

### **XI-1 Mise à jour des cartes : évolution du couvert végétal**

Nous avons utilisé les images Landsat-5 TM acquises les 17-06-1984, 25-07-1992, 18-06-1996, 27-08-1998 et 27-06-2005, les images Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et 11-08-2001 et les images SPOT 1 HRV du 01-08-1987 et SPOT 5 HRG du 29-07-2006 (voir tableau II-1) pour étudier l'évolution du NDVI calculé à partir des VN et des réflectances au sol estimées par REFLECT. Les corrections atmosphériques sont réalisées avec des valeurs d'AOD estimées par la méthode des cibles obscures (une valeur moyenne par image). La scène utilisée couvre une partie des îles de Montréal et Laval et une partie des Laurentides (figure XI-1). Le NDVI est utilisé pour deux raisons : (a) la scène est riche en végétation et (b) la majorité des changements concernent le couvert végétal. Deux échelles de temps sont considérées : le court terme, entre le début et la fin de l'été (les images ne doivent pas être espacées de plus de 3 ans) et le long terme, pour une ou deux décennies (les images doivent être prises à la même période de la saison). L'utilisation de capteurs différents permet de montrer l'effet de la combinaison des capteurs sur les applications multi-dates.



Figure XI-1. Scène utilisée pour l'étude de l'évolution du couvert végétal (vraies couleurs).

## XI-1-1 Évolution du NDVI à court terme

Les graphiques de la figure XI-2 illustrent les densités des points dans l'espace (NDVI du début de l'été, NDVI de la fin de l'été).

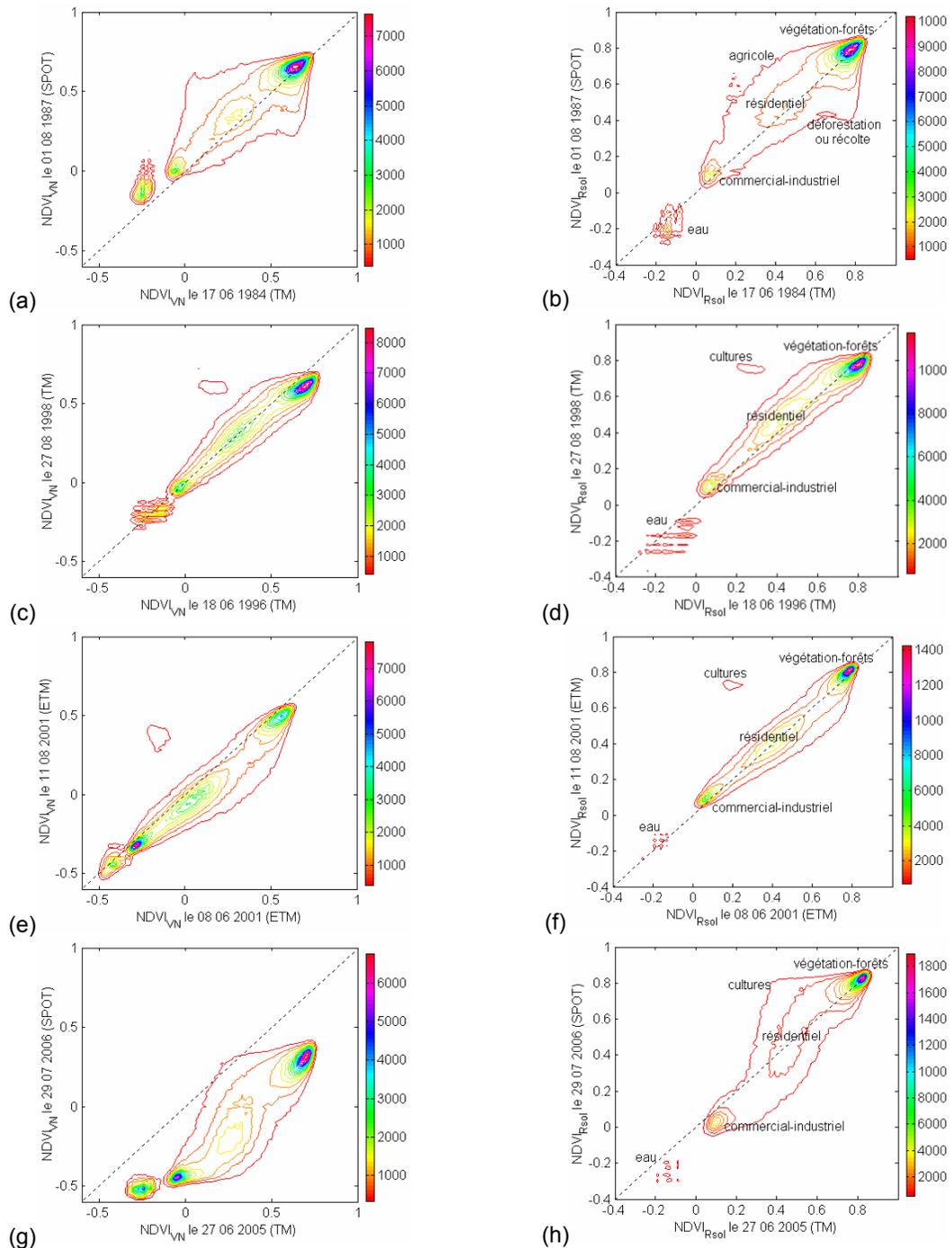


Figure XI-2. Évolution du NDVI calculé à partir des VN et des réflectances au sol entre le début et la fin de l'été. L'écart entre les années des paires d'images ne dépasse pas 3 ans.

La comparaison des NDVIs issus d'images acquises en début et en fin de l'été permet de voir essentiellement l'évolution phénologique de la végétation, notamment les cultures. Les valeurs du NDVI calculés à partir des VN sont sous-estimés dans tous les cas et sont très différents lorsque les capteurs ne sont pas les mêmes (figure XI-2-g). Le calcul de la réflectance au sol permet d'obtenir des NDVIs comparables.

Sur les graphiques de densités de points, les concentrations de points peuvent être identifiés pour les NDVIs calculés à partir des réflectances au sol comme suit : les NDVIs les plus bas (<0) correspondent à l'eau, les NDVIs entre 0.1 et 0.2 représentent la classe industriel/commercial et les sols nus, les zones résidentiels riches en surfaces gazonnées et en arbres ont des NDVIs de l'ordre de 0.5, et enfin, les NDVIs les plus élevés (>0.7) caractérisent les pixels à dominance végétale (forêts et champs agricoles verts). Une telle caractérisation des valeurs du NDVI ne serait possible que si les images sont bien corrigées. Ce résultat est également rapporté par Chen *et al.* (2005). En ce qui concerne l'évolution du NDVI entre les deux dates indiquées (début et fin de l'été), nous pouvons voir à chaque fois l'apparition de cultures à la fin de l'été (NDVI plus élevé).

### **XI-1-2 Évolution du NDVI à long terme**

Comme nous l'avons vu ci-haut, les NDVIs calculés à partir des VN sont très différents lorsqu'on fait les comparaisons en utilisant deux capteurs différents (figure XI-3 c et g). La raison principale est la différence entre les gains des différents capteurs. La correction radiométrique permet de minimiser ce problème. Le même constat est rapporté par Hall *et al.* 1991, lors d'une étude impliquant des images multi-dates et multi-capteurs. L'étude des changements sur une ou deux décennies (figures XI-3 et XI-4) montre que les changements les plus importants sont dus à la déforestation d'une grande partie de la rive Nord de l'île de Montréal et l'apparition de nouvelles zones résidentielles. Ce phénomène est illustré par l'exemple de la figure (XI-5).

Par ailleurs, on peut noter que l'image SPOT 5 du 29-07-2006 est saturée dans la bande PIR donnant un NDVI également saturé (figure XI-4-c et d). Ce problème est probablement dû à un choix inadéquat du gain du capteur dans cette bande vu la richesse du territoire observé en végétation.

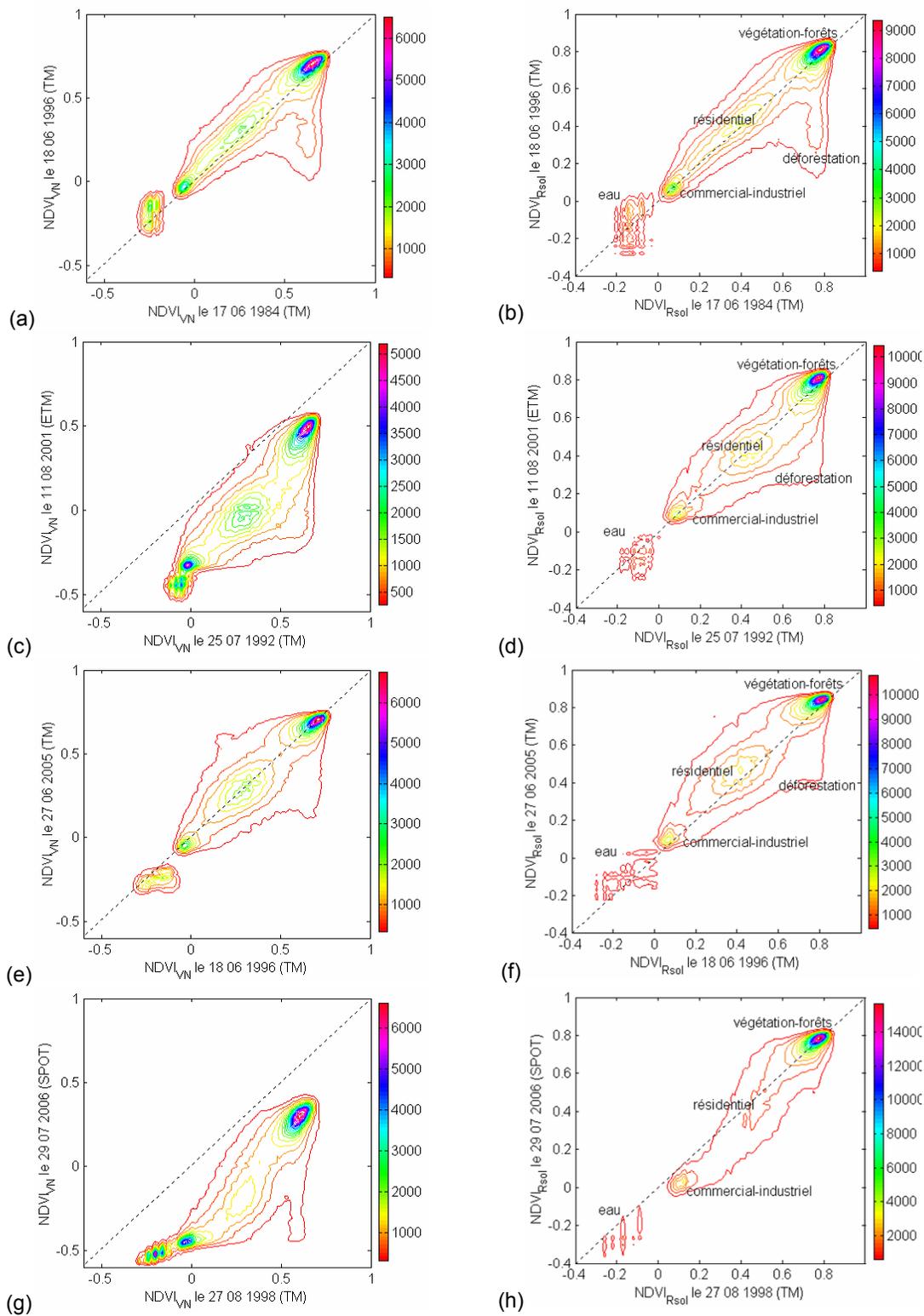


Figure XI-3. Évolution sur une décennie du NDVI calculé à partir des VN et des réflectances au sol à l'aide de REFLECT. Les paires d'images sont acquises approximativement à la même période de la saison.

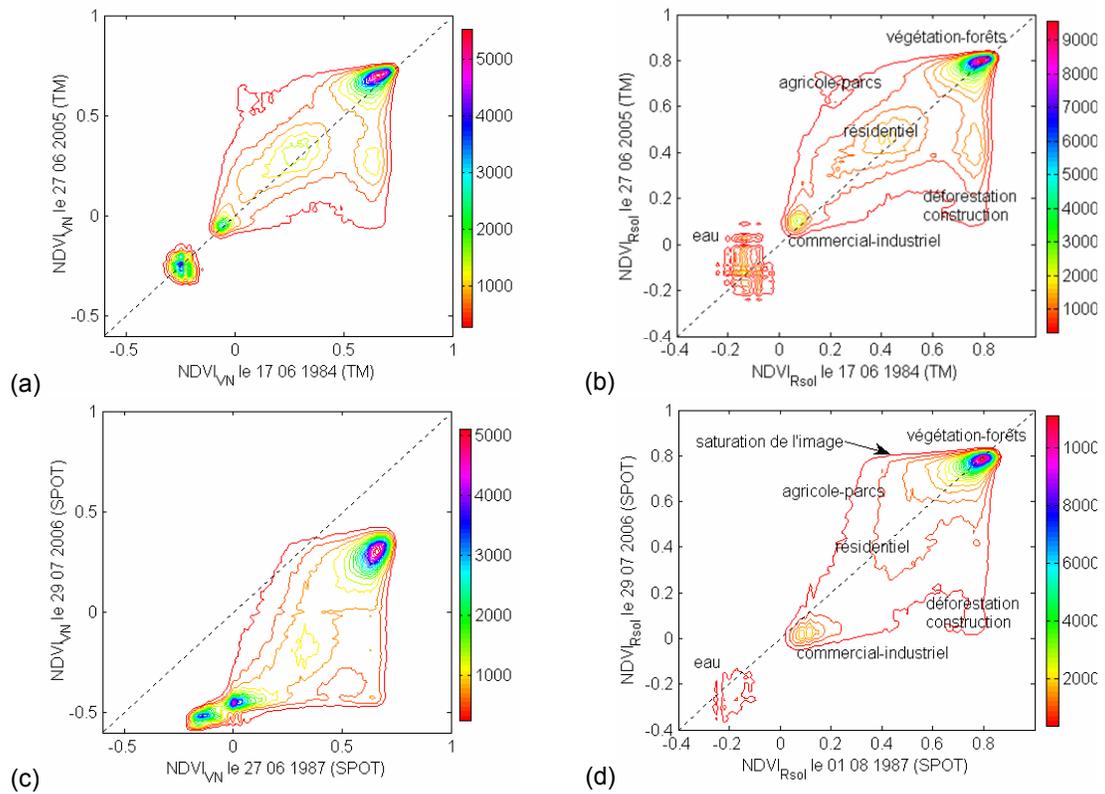


Figure XI-4. Évolution sur deux décennies du NDVI calculé à partir des VN et des réflectances au sol à l'aide de REFLECT. Les paires d'images sont acquises à la même période de la saison.

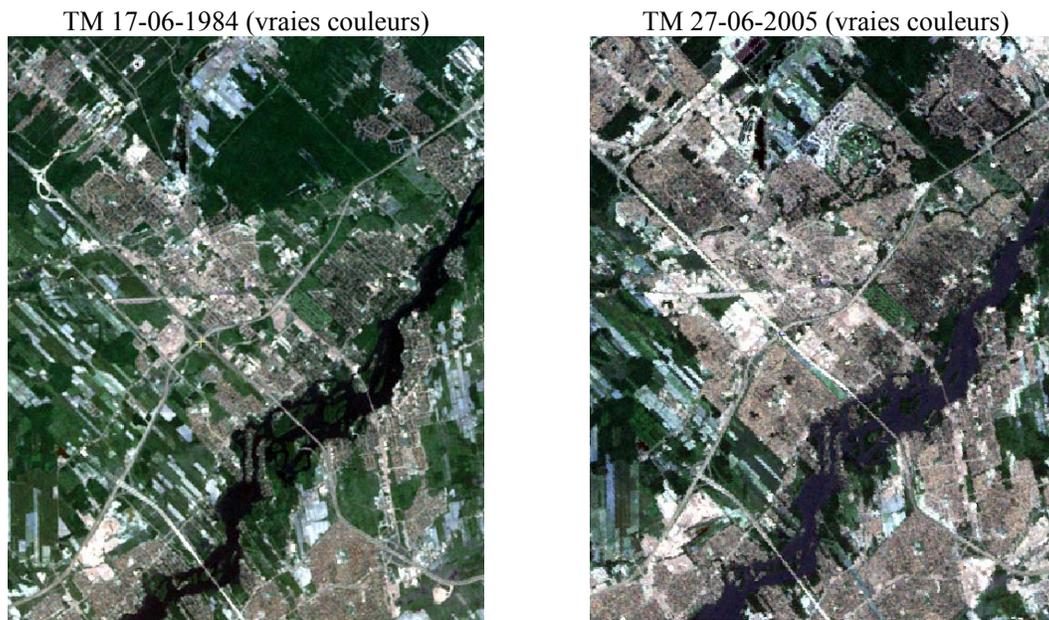


Figure XI-5. Exemple des changements de l'occupation du sol en deux décennies sur la rive Nord de Montréal. Les changements sont caractérisés essentiellement par la transformation des zones de végétation en zones résidentielles.

## XI-2 Effet de l'atmosphère sur les algorithmes de classification

### XI-2-1 Simulation de l'effet des aérosols sur les espaces de représentation bleu-vert et rouge-PIR

Sur la figure XI-6, des combinaisons de réflectances faibles, moyennes et élevées sont représentées dans les plans spectraux bleu-vert et rouge-PIR. Les valeurs de ces réflectances (choisies arbitrairement) dans les bandes bleue, verte et rouge sont : 0.05 pour faible, 0.15 pour moyenne et 0.25 pour élevée. L'étendue de ces valeurs est plus élevée dans le PIR (respectivement 0.05, 0.2 et 0.35) puisque les surfaces naturelles sont plus réfléchissantes dans cette gamme du spectre. Les réflectances apparentes sont simulées pour deux conditions atmosphériques (AOD=0.1 et AOD=0.3) en utilisant les paramètres atmosphériques calculés par REFLECT (les autres conditions sont fixées à :  $H = 100$  m,  $H_r = 40\%$ ,  $\theta_s = 25^\circ$ ,  $\varphi_s = 130^\circ$ , l'effet d'adjacence n'est pas considéré). Nous pouvons constater que les effets additifs et multiplicatifs sur la réflectance apparente sont très importants notamment pour les faibles réflectances des bandes bleue et verte (effet additif) et les réflectances élevées de la bande PIR (effet multiplicatif). Ces effets diminuent les distances entre les points des plans spectraux mais ne changent pas beaucoup les distances relatives entre ces points. En d'autres termes, la modification des espaces des bandes spectrales est presque linéaire (sans l'effet d'adjacence).

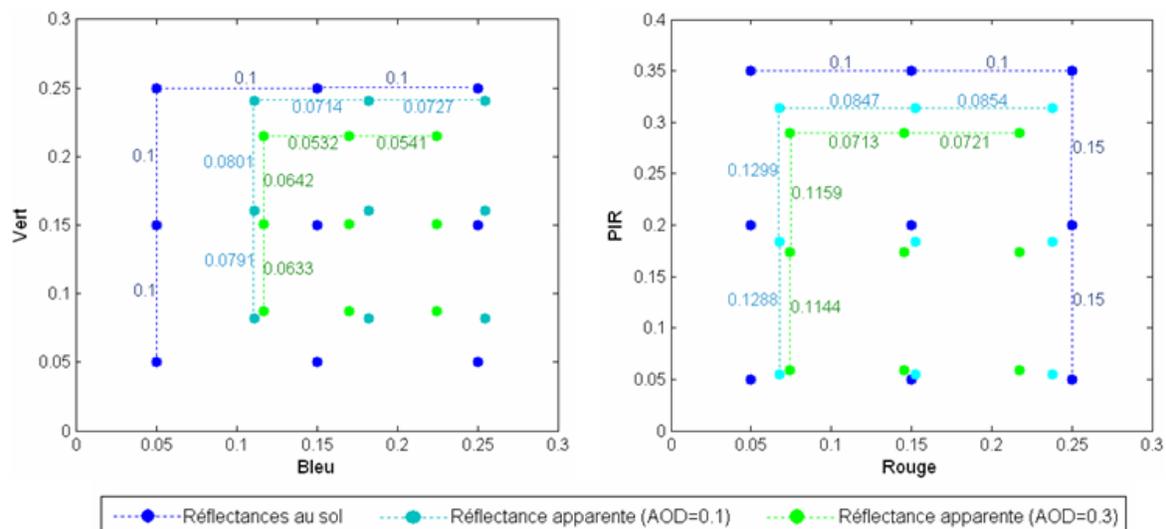


Figure XI-6. Effet de l'atmosphère sur les réflectances apparentes dans les plans bleu-vert et rouge-PIR. Combinaison de trois valeurs de réflectance au sol par bande spectrale et deux valeurs de l'AOD (0.1 et 0.3). Les autres conditions sont fixées à :  $H = 100$  m,  $H_r = 40\%$ ,  $\theta_s = 25^\circ$  et  $\varphi_s = 130$ .

## XI-2-2 Classification dirigée d'une image simulée

La classification est généralement utilisée pour la cartographie ou pour la détection des changements. Ceci implique l'utilisation de plusieurs images, ou des mosaïques multi-scènes et/ou multi-dates. Nous avons simulé une image multispectrale à partir des signatures spectrales au sol de huit matériaux (figure XI-7) disposées en bandes verticales (figure XI-8-a) dans l'ordre suivant : feuillus, argile, conifère, gazon, asphalte, roche, tuile rouge. Nous avons généré quatre bandes spectrales correspondant aux sensibilités spectrales des bandes bleue, verte, rouge et PIR du capteur ETM+ de Landsat-7 en utilisant notre application « SigSpec\_Librairie » présentée au chapitre II.

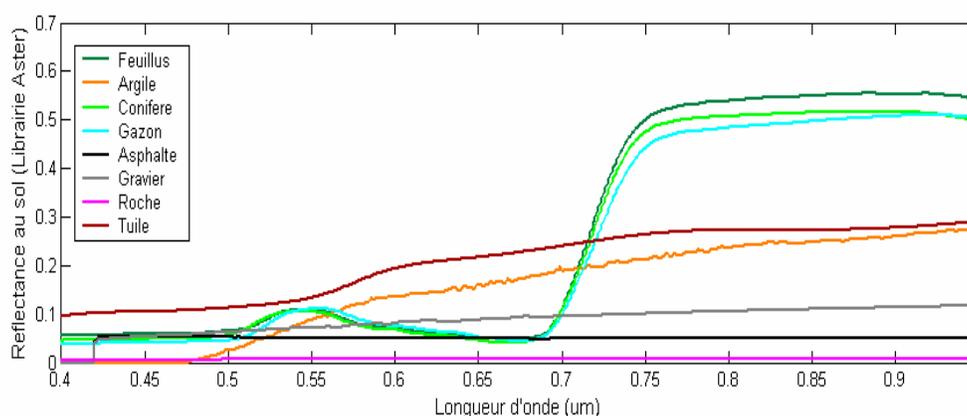


Figure XI-7. Signatures spectrales des matériaux utilisés pour la constitution et la classification d'une image simulée.

Nous avons ensuite divisé l'image horizontalement en trois zones correspondant à trois conditions atmosphériques qu'on pourrait qualifier de ciel clair (AOD=0.05), ciel moyen (AOD=0.2) et ciel brumeux (AOD=0.4). L'algorithme REFLECT nous a permis de calculer des paramètres atmosphériques (transmittance totale  $T_{tot}$ , réflectance de parcours  $\rho_{atm}$  et albédo sphérique  $S_{alb}$ ) correspondants à ces trois états (voir tableau XI-1).

Les réflectances apparentes simulées (8 matériaux, 3 conditions atmosphériques) sont illustrées par la figure XI-8-b. Les figures XI-8-c et XI-8-d montrent respectivement la classification des matériaux avec les réflectances au sol et les réflectances apparentes. Nous pouvons voir que les effets atmosphériques provoquent des confusions entre les classes qui se ressemblent, dans notre cas la roche avec le gravier, l'argile avec la tuile, le conifère avec le feuillus, le gazon avec le conifère et l'asphalte avec le gravier.

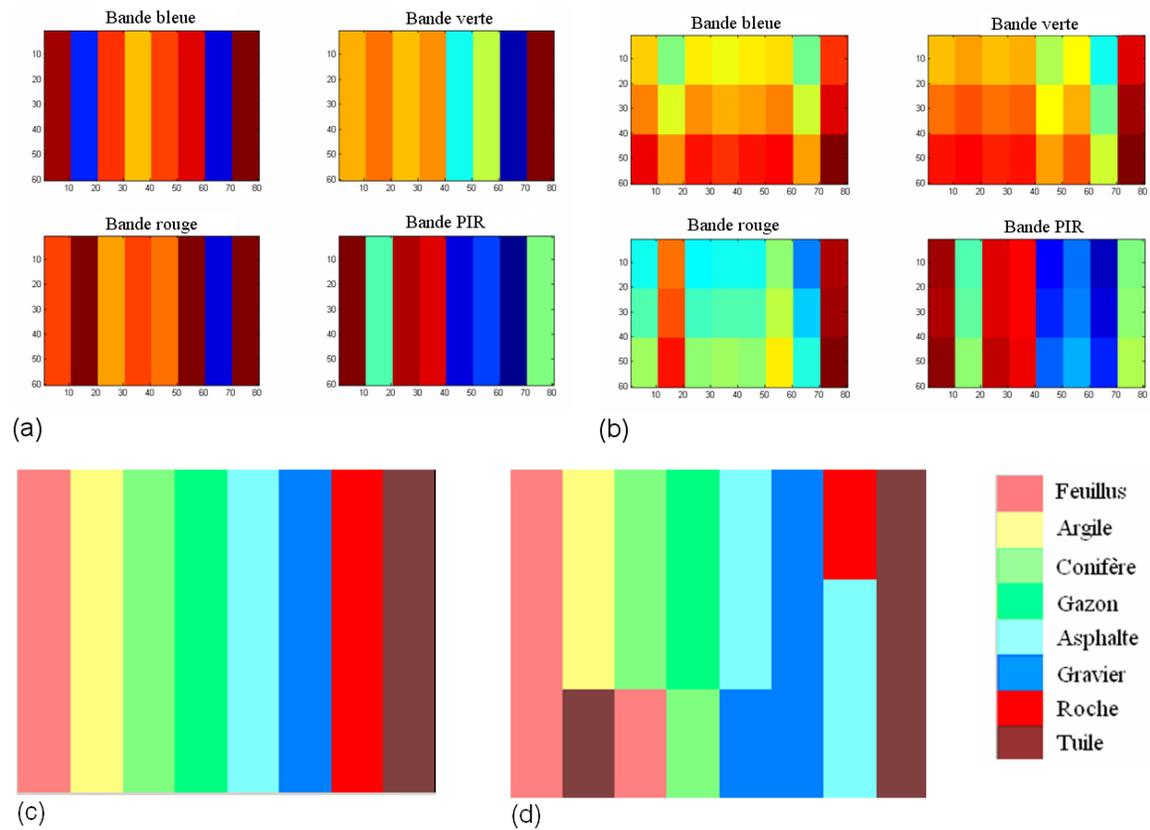


Figure XI-8. Classification d'une image simulée (4 bandes spectrales et huit matériaux) en utilisant les réflectances au sol et les réflectances apparentes simulées à l'aide de REFLECT pour trois conditions atmosphériques. (a) : bandes bleue, verte, rouge et PIR de l'image des réflectances au sol; (b) : bandes bleue, verte, rouge et PIR de l'image des réflectances apparentes; (c) : classification de l'image des réflectances au sol; (d) : classification de l'image des réflectances apparentes.

Tableau XI-1. Paramètres atmosphériques pour les trois conditions atmosphériques choisies pour l'image simulée à partir des matériaux de la librairie ASTER de USGS.

	Ciel clair (AOD=0.05)			Ciel moyen (AOD=0.2)			Ciel brumeux (AOD=0.4)		
	$T_{tot}$	$\rho_{atm}$	$S_{alb}$	$T_{tot}$	$\rho_{atm}$	$S_{alb}$	$T_{tot}$	$\rho_{atm}$	$S_{alb}$
Bande bleue	0.7519	0.0728	0.0927	0.6148	0.0838	0.0826	0.4925	0.1184	0.0751
Bande verte	0.8176	0.0398	0.0637	0.6993	0.0511	0.0657	0.5435	0.0738	0.0658
Bande rouge	0.8759	0.0215	0.0413	0.7788	0.0319	0.0516	0.6422	0.0452	0.0578
Bande PIR	0.9042	0.0099	0.0224	0.8310	0.0182	0.0363	0.7281	0.0252	0.0461

### XI-2-3 Classification dirigée des images satellitales

Nous avons réalisé des classifications dirigées et non dirigées avec les VN ensuite avec les réflectances au sol calculées à l'aide de REFLECT. Les corrections appliquées ne tiennent pas compte des effets topographiques, l'AOD est estimé par la méthode des cibles obscures, une valeur moyenne est utilisée pour chacune des images. Les bandes spectrales utilisées sont : verte, rouge, PIR et MIR. Les deux types de classifications ont été appliqués aux images et aux combinaisons d'images suivantes :

- Image 1 : Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001,
- Image 2 : Landsat-7 ETM+ du 11-08-2001,
- Image 3 : SPOT 5 HRG du 29-07-2006,
- Combinaisons 1 : image 1 et image 2, dont les distributions des VN sont pratiquement similaires (voir figure VIII-2),
- Combinaisons 2 : image 1 et image 3, dont les distributions des VN sont très différentes (voir figure VIII-2),
- Combinaisons 3 : l'ensemble des images 1, 2 et 3.

La scène illustrée sur la figure XI-9 a été découpée sur les trois images, elle englobe la partie commune sans nuages.

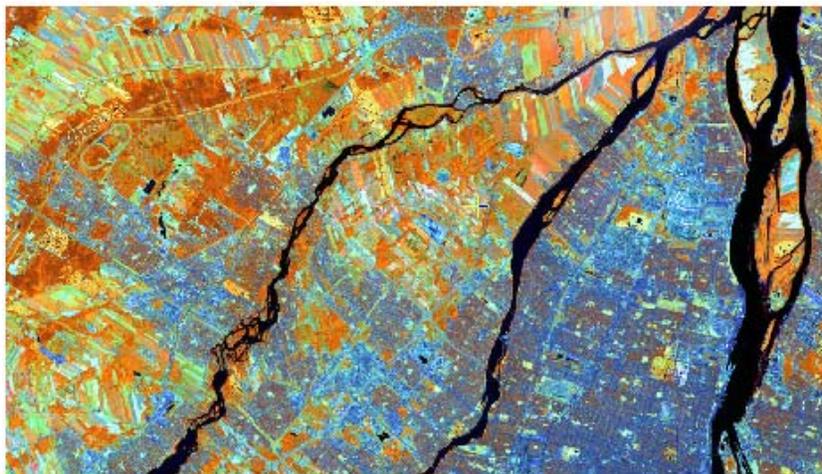


Figure XI-9. Scène utilisée pour les classifications supervisées et non supervisées des images Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et du 11-08-2001, SPOT 5 HRG du 29-07-2006 et de leurs combinaisons (composé coloré : PIR dans R, MIR dans V et rouge dans B).

Pour les classifications supervisées, les sept classes suivantes sont considérées :  $c_1$ =eau,  $c_2$ =conifère,  $c_3$ =feuillu,  $c_4$ =agricole,  $c_5$ =gazon/golf,  $c_6$ =résidentiel,  $c_7$ =commercial/industriel. L'algorithme de distance minimale donne les résultats présentés sur le tableau XI-2. L'exactitude de la classification évaluée à partir de sites de validation est légèrement plus élevée dans le cas où les images corrigées sont utilisées. Lorsque l'algorithme de maximum de vraisemblance est utilisé, l'exactitude obtenue avec les réflectances au sol est pratiquement la même que celle obtenue les VNs (tableau XI-2).

Les principales confusions se traduisent par l'affectation de pixels de la classe des conifères ( $p_2$ ) dans la classe des feuillus ( $c_3$ ) et dans la classe résidentiel ( $c_6$ ) et vice versa. Les pixels de la classe feuillus ( $p_3$ ) peuvent aussi être classés dans la classe gazon/golf ( $c_5$ ). Certains pixels de la classe gazon/golf ( $p_5$ ) sont également affectés aux classes feuillus ( $c_3$ ) ou agricole ( $c_4$ ). Les pixels de la classe commercial/industriel sont parfois classés comme agricole ( $c_4$ ) ou comme résidentiel ( $c_6$ ).

Ainsi, les corrections radiométriques des images n'améliorent que très peu l'exactitude de la classification évaluée à l'aide des sites de validation. Ce résultat reste toutefois tributaire du choix de ces sites. Nous avons noté sur les cartes issues des classifications appliquées des exemples où les corrections radiométriques améliorent les résultats, deux exemples sont présentés ci-bas.

Tableau XI-2. Résultats de la classification supervisée obtenue par la méthode de la distance minimale et la méthode du maximum de vraisemblance avec l'utilisation des VNs et des réflectances au sol estimées par REFLECT.

	la méthode de la distance minimale		méthode du maximum de vraisemblance	
	Exactitude avec VNs	Exactitude avec réflectances	Exactitude avec VNs	Exactitude avec réflectances
Image 1	79.37%	80.81%	80.94%	85.05%
Image 2	76.41%	76.58%	78.04%	78.21%
Image 3	67.82%	66.31%	69.47%	69.57%
Combinaison 1	84.00%	85.00%	84.09%	83.73%
Combinaison 2	79.90%	80.58%	82.12%	81.99%
Combinaison 3	82.14%	84.36%	84.21%	84.26%

### Exemple d'amélioration des résultats – sols v.s. commercial/industriel

Les résultats de la classification dirigée (par la méthode de la distance minimale) de l'image Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 brute (VNs) montrent que les champs agricoles situés au nord-ouest de la scène (dans la région de Ste-Anne-des-Plaines, Québec) sont confondus avec la classe commercial/industriel, probablement à cause de l'existence de sols à nu dans la classe agricole (figure XI-10-a). La correction radiométrique des images a permis de mieux discriminer ces deux classes et ce même si une seule image a été utilisée (figure XI-10-b).

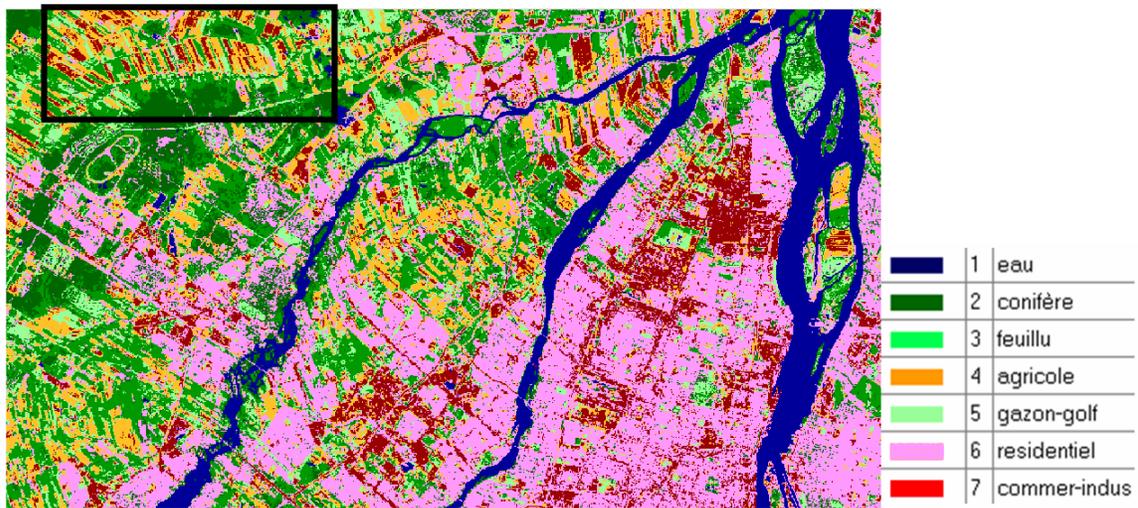


Figure XI-10-a. Carte issue de la classification dirigée des VNs de l'image Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001.

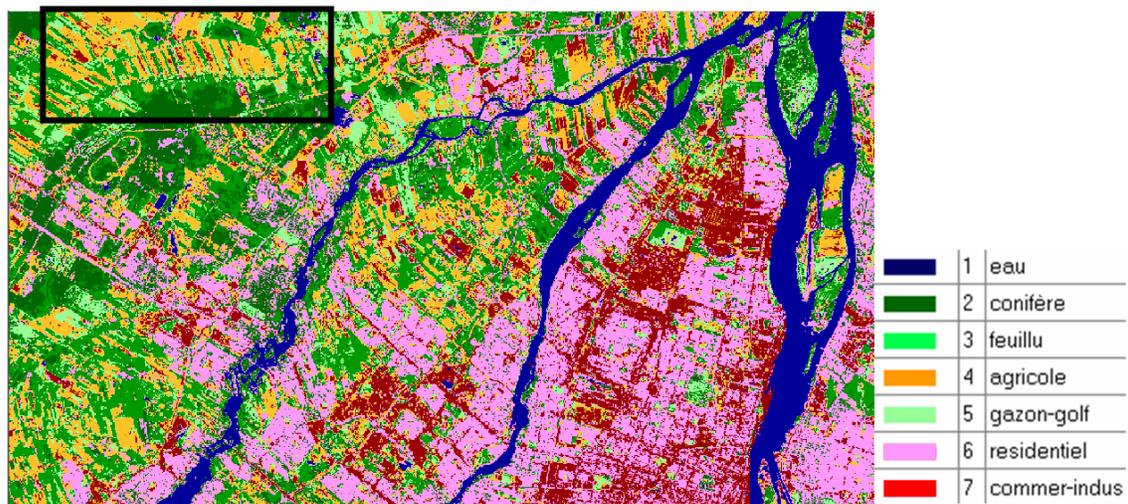


Figure XI-10-b. Carte issue de la classification dirigée des réflectances au sol de l'image Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001.

## Exemple d'amélioration des résultats – les types de végétation

Un autre exemple où la séparabilité des classes est rehaussée par les corrections radiométriques : dans le cas de la combinaison 2 (Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et SPOT 5 HRG du 29-07-2006), l'utilisation des réflectances plutôt que les VN permet de mieux discriminer la végétation de l'île Ste-Thérèse située au nord-est de l'île de Montréal (figure XI-11). Ce constat découle de la comparaison visuelle des résultats de la classification avec l'image SPOT 5 du 29-07-2006 représentée dans le composé coloré qui permet le mieux de distinguer la végétation (PIR dans R; MIR dans V; rouge dans B).

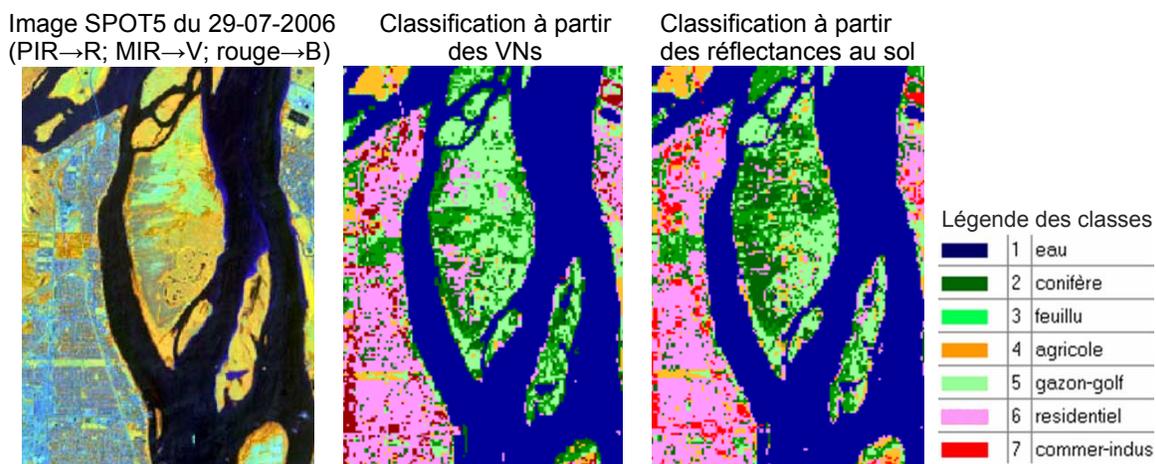


Figure XI-11. Comparaison des résultats de la classification dirigée de la combinaison des images Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et SPOT 5 du 29-07-2006 en utilisant les VN et les réflectances au sol. Site illustré : île Ste-Thérèse au nord-est de Montréal, Québec (45° 41' N; 73° 28' O).

### XI-2-4 Classification non dirigée des images satellitaires

Une classification non dirigée (k-means) à huit classes a été appliquée pour les trois images et les trois combinaisons citées au début de la section précédente (VIII-2-3). La comparaison visuelle des cartes issues des images brutes et des images corrigées montre qu'en général, les corrections radiométriques rehaussent la discriminabilité des classes, notamment les différents types de végétation. Ceci est encore plus vrai pour les combinaisons d'images. La figure XI-12 illustre ce constat : la classification de la combinaison des trois images (Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et du 11-08-2001 et SPOT 5 HRG du 29-07-2006) sépare les forêts et les cultures pour les images corrigées, ce qui n'est pas le cas avec les images brutes.

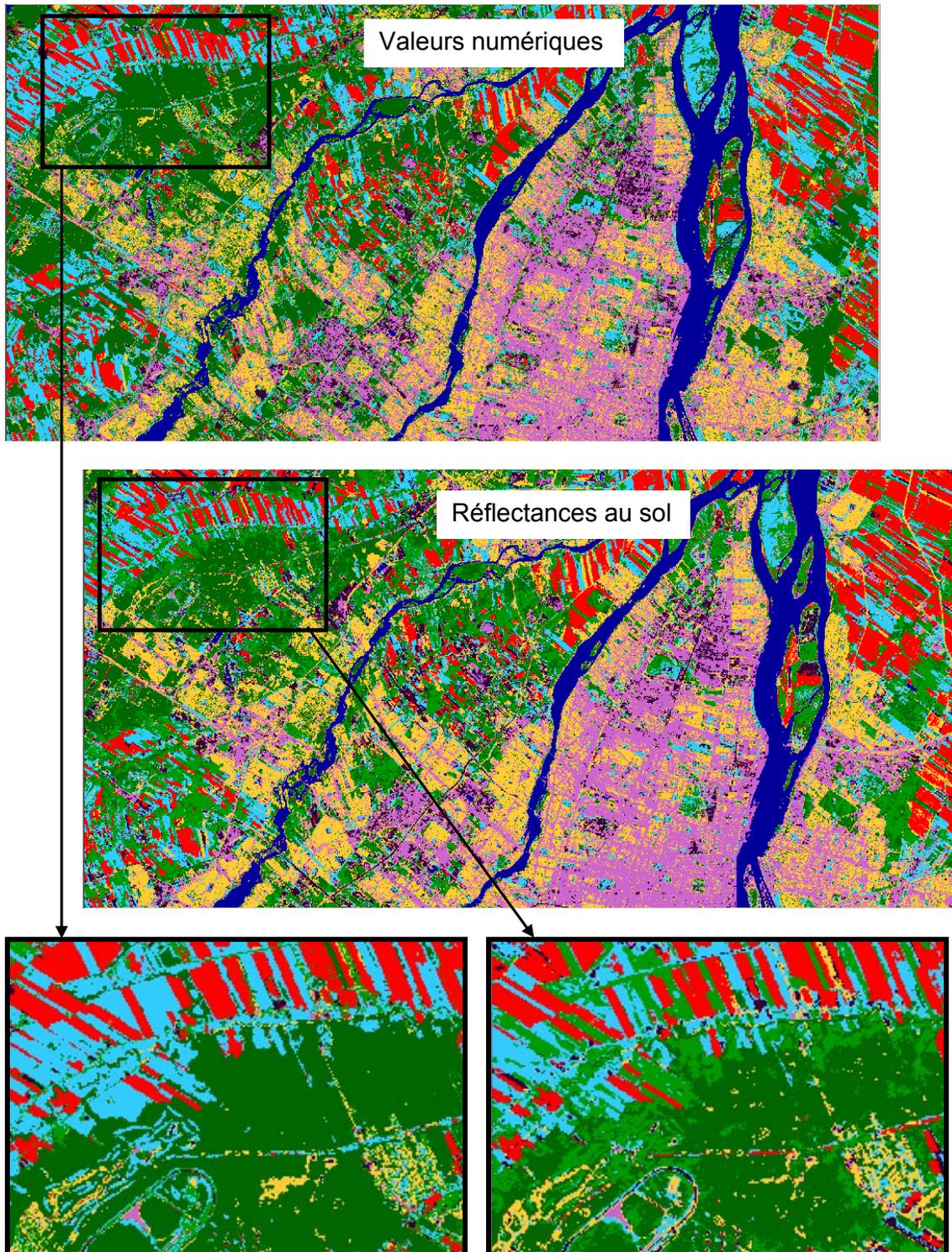


Figure XI-12. Classification non dirigée de la combinaison des trois images (Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 et du 11-08-2001 et SPOT 5 HRG du 29-07-2006) en utilisant les images brutes (VNs) et corrigées (réflectances au sol).

## CHAPITRE XII - Effet de l'atmosphère sur les applications en agriculture

### XII-1 Effet de l'AOD sur l'observation de la végétation

La distorsion de la luminance apparente par l'atmosphère fait que les indices de végétation calculés sans corrections atmosphériques sont erronés. La figure XII-1 illustre six indices de végétation (NDVI, RDVI, OSAVI, SARVI, MCARI1 et MTVI1) calculés pour des réflectances au sol et apparentes (simulées par REFLECT) d'une surface couverte de X% de végétation (de type « grass » dans la librairie ASTER de USGS) et de (100-X)% de sol (de type « light yellowish brown dry loam » dans la librairie ASTER), avec X=20%, 40%, 60%, 80% et 100%. Quatre conditions atmosphériques correspondant aux valeurs d'AOD de 0.05, 0.2, 0.4 et 0.6 sont considérées. Les autres conditions sont fixées à  $H_r=40\%$ ,  $H=100$  m,  $\theta_s=30^\circ$ ,  $\varphi_s=130^\circ$ , terrain plat, visée du nadir). Les définitions et les propriétés des indices de végétation testés sont données par Haboudane *et al.* 2004 et Zarco-Tejada *et al.* 2005.

Pour les surfaces à dominance végétale, les VIs calculés à partir des réflectances apparentes sont fortement sous-estimés, l'erreur introduite par l'atmosphère est proportionnelle à la valeur de l'AOD (tableau XII-1), elle peut dépasser les 30% dans le cas des valeurs élevées d'AOD. Ceci est dû à deux raisons : (1) la réflectance de la végétation est faible dans le rouge ce qui fait que l'effet additif augmente la réflectance apparente alors que l'effet multiplicatif est relativement faible, (2) la réflectance dans le PIR est élevée et la diminution due à l'effet multiplicatif est plus importante que l'augmentation par l'effet additif. Ce résultat est également rapporté par plusieurs auteurs (Teillet *et al.* 1996 et 1997-b; Guyot et Gu, 1994; Myneni et Asrar, 1994). Toutefois, le SARVI (soil and aerosol resistant vegetation index) de Kaufman et Tanré, 1992, est effectivement résistant à l'effet des aérosols pour les surfaces à dominance végétale, ceci grâce à l'introduction de la bande bleue dans la définition de cet indice. Ce résultat est également rapporté par Bannari *et al.* (1999). Pour les surfaces peu végétalisées, le SARVI est par contre fortement surestimé par l'effet des aérosols.

Étant calculés à partir d'une information 2D (réflectance de la surface de la canopée), les indices de végétation posent un problème qui limite souvent leur utilisation : même si la

biomasse végétale continue à croître, les VIs saturent dès que la canopée se ferme rendant le sol invisible. Des indices comme le MCARI1 ou le MTVI1 tentent de diminuer ce problème.

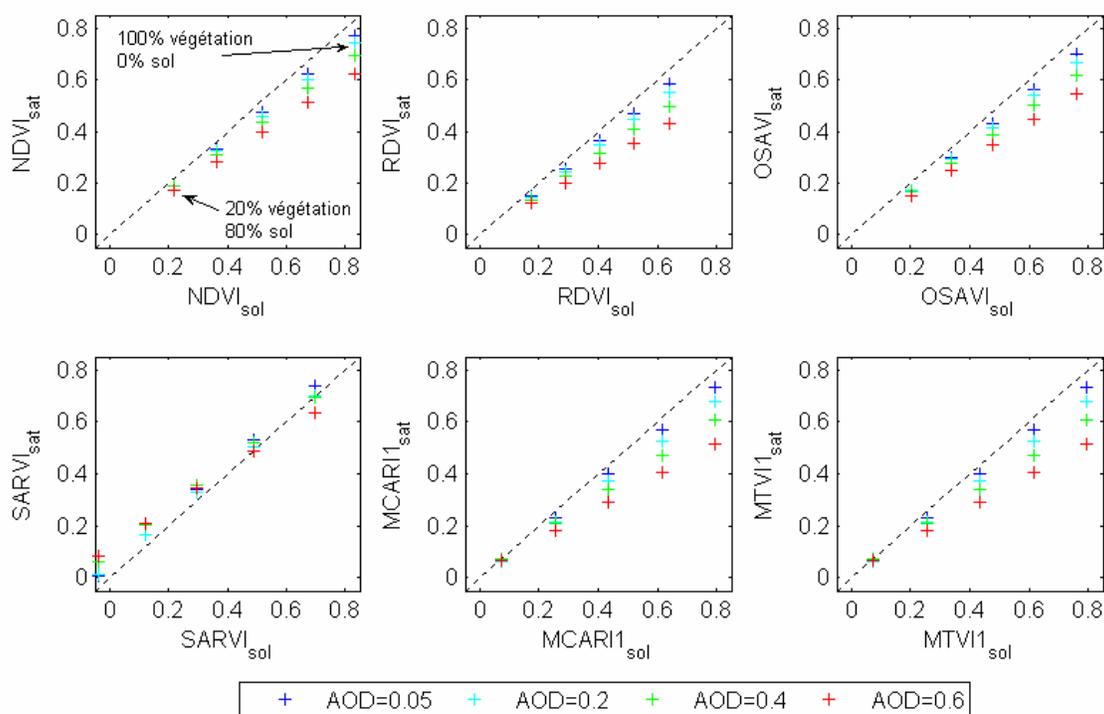


Figure XII-1. Indices de végétation apparents (avec AOD = 0.05, 0.2, 0.4 ou 0.6) v.s. indices de végétation au sol pour des surfaces couvertes de X% de végétation et de (100-X)% de sol (avec X = 20%, 40%, 60%, 80% ou 100%).

Tableau XII-1. Erreurs relatives (en %) de calcul de six indices de végétation lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs d'AOD.

AOD	Couverture végétale complète (100%)				Couverture végétale partielle (40%)			
	0.05	0.2	0.4	0.6	0.05	0.2	0.4	0.6
<b>NDVI</b>	-7.44	-11.02	-16.61	-25.0	-10.04	-11.63	-14.91	-22.49
<b>RDVI</b>	-9.01	-13.96	-22.18	-32.33	-11.74	-15.09	-21.59	-31.27
<b>OSAVI</b>	-8.12	-12.32	-19.17	-28.53	-10.75	-13.12	-17.90	-26.59
<b>SARVI</b>	5.82	0.24	-0.67	-8.90	34.34	34.72	65.19	70.71
<b>MCARI1</b>	-7.78	-14.62	-23.92	-35.15	-8.77	-14.55	-18.48	-28.54
<b>MTVI1</b>	-7.78	-14.61	-23.92	-35.15	-8.77	-14.55	-18.48	-28.54

Les indices de végétation issus des images de télédétection sont souvent utilisés pour l'estimation de l'indice foliaire LAI (leaf area index). À cause du phénomène de saturation des indices de végétation (figure XII-2), le LAI est estimé à partir des VIs par des fonctions exponentielles du type  $LAI = a \cdot \exp(b \cdot VI)$  (Carlson et Ripley, 1997; Turner *et al.* 1999; Smith *et al.* 2008). Ainsi, même de faibles variations de l'indice de végétation entraînent des variations élevées dans les valeurs du LAI estimé, l'erreur est amplifiée à cause de la fonction exponentielle (tableau XII-2). Cette erreur pose un problème important dans l'application de la télédétection en agriculture.

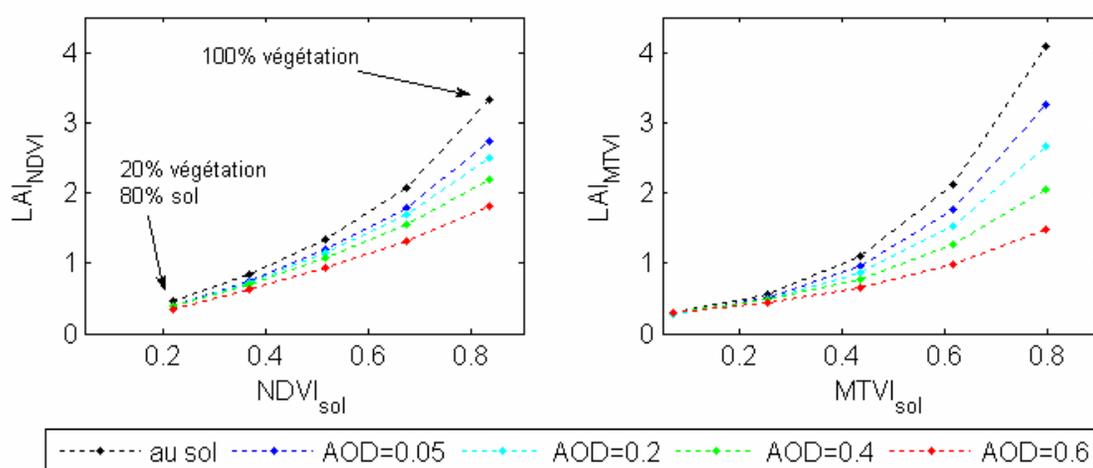


Figure XII-2. LAI estimé à partir des NDVIs et des MTVIs au sol et apparents pour quatre valeurs de l'AOD et cinq surfaces végétalisées (20%, 40%, 60%, 80% et 100%).

Tableau XII-2. Erreurs relative (en %) d'estimation du LAI à partir des indices de végétation (NDVI et MTVI) lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs de l'AOD.

AOD	Couverture végétale complète (100%)				Couverture végétale partielle (40%)			
	0.05	0.2	0.4	0.6	0.05	0.2	0.4	0.6
LAI <sub>NDVI</sub>	-17.68	-24.55	-33.79	-45.40	-12.37	-14.27	-18.12	-26.79
LAI <sub>MTVI</sub>	20.26	-34.66	-50.16	-64.05	-7.80	-12.60	-15.73	-23.22

## XII-2 Effet de l'humidité relative de l'air

Le contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère, estimé à partir de l'humidité relative ( $H_r$ ) de l'air (équation 14-a), affecte les VIs basés sur la bande PIR à cause des raies d'absorption des molécules d'eau dans les longueurs d'onde allant de 800 à 850 nm (voir annexe 1). Les sensibilités spectrales de la bande PIR de la majorité des capteurs multispectraux englobent ces longueurs d'onde, le capteur EO-1 ALI est une exception, il possède deux bandes PIR disposées de part et d'autre des raies d'absorption de la vapeur d'eau (voir annexe 4).

L'erreur supplémentaire à celle des aérosols se traduit par une sous-estimation de plus de 5% lorsque  $H_r$  passe de 20 à 80% pour une couverture végétale complète et de plus de 10% pour une couverture végétale partielle (tableau XII-3). L'erreur d'estimation du LAI correspondante est de l'ordre de 10 % également (tableau XII-4).

Tableau XII-3. Erreurs relative (en %) de calcul de six indices de végétation lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs de  $H_r$ . L'AOD est fixé à 0.1.

$H_r$ (%)	Couverture végétale complète (100%)				Couverture végétale partielle (40%)			
	20	40	60	80	20	40	60	80
<b>NDVI</b>	-8.51	-9.21	-9.77	-10.24	-9.67	-13.00	-15.59	-17.78
<b>RDVI</b>	-10.00	-11.79	-13.18	-14.33	-11.53	-15.59	-18.71	-21.30
<b>OSAVI</b>	-9.16	-10.35	-11.29	-12.08	-10.45	-14.10	-16.93	-19.30
<b>SARVI</b>	5.84	4.53	3.43	2.47	44.68	36.09	28.98	22.81
<b>MCARI1</b>	-8.83	-11.35	-13.25	-14.83	-8.15	-14.17	-18.72	-22.44
<b>MTVI1</b>	-8.83	-11.35	-13.25	-14.83	-8.15	-14.17	-18.72	-22.44

Tableau XII-4. Erreurs relative (en %) d'estimation du LAI à partir des indices de végétation (NDVI et MTVI) lorsque les réflectances apparentes sont utilisées pour deux types de couverture végétale (complète et partielle) et quatre valeurs de  $H_r$ . L'AOD est fixé à 0.1.

$H_r$ (%)	Couverture végétale complète (100%)				Couverture végétale partielle (40%)			
	20	40	60	80	20	40	60	80
<b>LAI<sub>NDVI</sub></b>	-19.83	-21.18	-22.23	-23.11	-11.92	-15.88	-18.92	-21.44
<b>LAI<sub>MTVI</sub></b>	-22.67	-28.13	-32.01	-35.05	-7.26	-12.30	-15.91	-18.76

## XII-3 Influence de l'effet d'adjacence sur les indices de végétation

Dans les applications de la télédétection en agriculture, il arrive souvent qu'on ait à analyser la variation spatiale d'une culture dans un champ entouré d'une surface non végétale tel que du sol à nu par exemple, très réfléchissant dans la bande rouge. Dans ce cas, l'effet d'adjacence dans cette bande spectrale fait que les pixels des bordures des champs agricoles ont des VIs sous-estimés.

Ainsi, à partir des signatures spectrales issues de la librairie ASTER de USGS citées au point XII-1, nous avons simulé un champ agricole couvert de végétation et entouré de sol (figure XII-3). Les réflectances apparentes des bandes rouge et PIR sont simulées à l'aide de l'équation 7, des paramètres atmosphériques calculées par REFLECT et du modèle d'adjacence proposé dans la section IV-5. À cause de l'effet d'adjacence du sol sur les pixels de végétation mitoyens, les NDVI apparemment sont sous-estimés dans les bordures du champ. Cette sous-estimation dépend de la valeur de l'AOD (figure XII-4). En plus de l'effet de l'atmosphère qui introduit une sous-estimation de l'ordre de 0.1 à 0.26 ( $NDVI_{app} - NDVI_{sol}$  dans le tableau XII-5), l'effet d'adjacence rajoute une sous-estimation supplémentaire qui dépend de la proximité des pixels de sol et de la valeur de l'AOD. Les pixels de végétation immédiatement voisins du sol sont affectés par des sous-estimations supplémentaires de près de 0.03 (en unités de NDVI) pour un ciel clair (AOD=0.05) et de 0.13 dans le cas d'un ciel brumeux (AOD=0.6) (tableau XII-5).

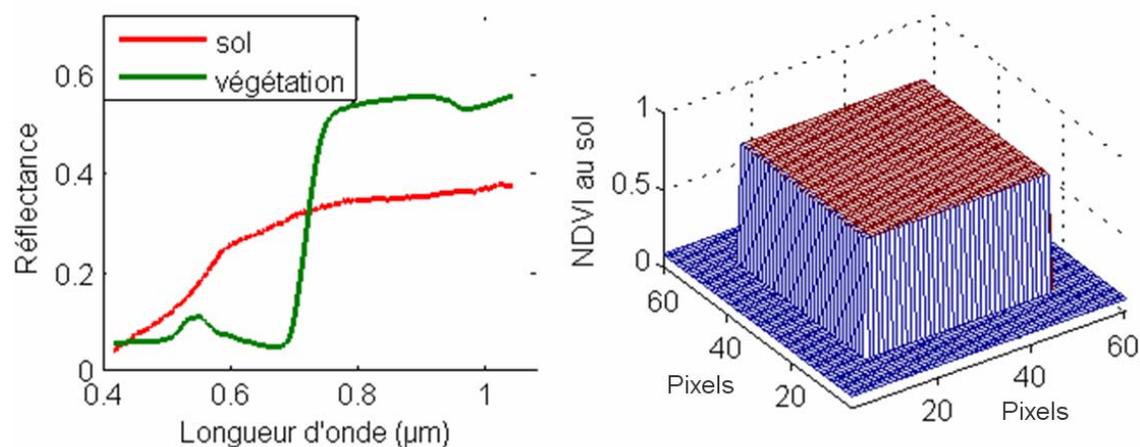


Figure XII-3. Simulation d'un champ agricole couvert de végétation et entouré de sol.

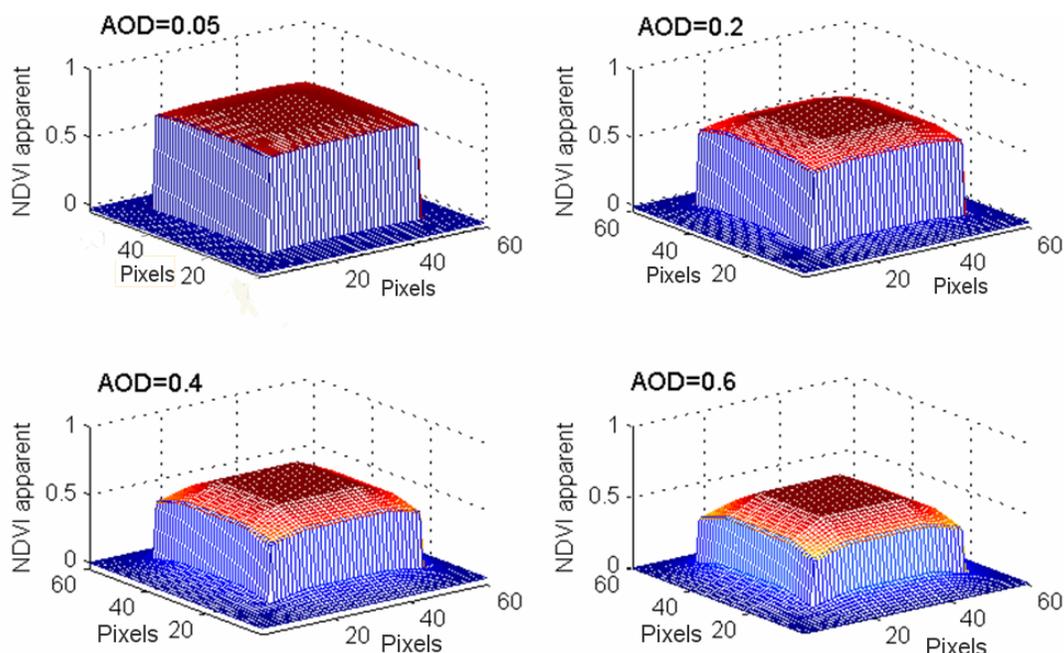


Figure XII-4. NDVI calculé à partir des réflectances apparentes d'un champ agricole simulé avec effet de l'adjacence du sol sur la végétation. Quatre valeurs de l'AOD sont considérées.

Tableau XII-5. Erreur de sous-estimation du NDVI apparent par rapport au NDVI au sol et erreur supplémentaire ( $\Delta\text{NDVI}_{\text{app}}$ ) due à l'effet d'adjacence sur les pixels à proximité du sol pour le champ agricole simulé de la figure XII-4.

Erreur sur le NDVI	AOD=0.05	AOD=0.2	AOD=0.4	AOD=0.6
$\text{NDVI}_{\text{app}} - \text{NDVI}_{\text{sol}}$	-0.1086	-0.1411	-0.1925	-0.2689
$\Delta\text{NDVI}_{\text{app}}$ : 1 <sup>er</sup> pixel voisin du sol	-0.0326	-0.0832	-0.1184	-0.1293
$\Delta\text{NDVI}_{\text{app}}$ : 2 <sup>ème</sup> pixel voisin du sol	-0.0288	-0.0735	-0.1047	-0.1142
$\Delta\text{NDVI}_{\text{app}}$ : 3 <sup>ème</sup> pixel voisin du sol	-0.0250	-0.0639	-0.0910	-0.0993
$\Delta\text{NDVI}_{\text{app}}$ : 4 <sup>ème</sup> pixel voisin du sol	-0.0212	-0.0543	-0.0775	-0.0845

## XII-4 Exemple avec les images Formosat-2

Nous allons dans cette section montrer un exemple avec neuf images du capteur expérimental à bord du satellite taïwanais Formosat-2 exploité par SPOT Image et qui acquiert les images avec une résolution spatiale de 8 m et une revisite quotidienne (Hagolle *et al.* 2008). Dans notre cas, les images fournies sont des réflectances apparentes en format 16 bits (voir chapitre III). Pour les corrections atmosphériques (effet d'adjacence compris), l'AOD est déterminé sur des cibles obscures de type végétation dense uniquement, l'eau étant trop affecté par le phénomène de réflexion spéculaire (figure XII-5-a). Afin de montrer l'effet des conditions

atmosphériques ainsi que l'effet d'adjacence sur les applications agricoles, nous avons sélectionné une surface végétalisée située dans la région de Boucherville, Québec, avec des bordures très brillantes dans la bande rouge (figure XII-5-b).

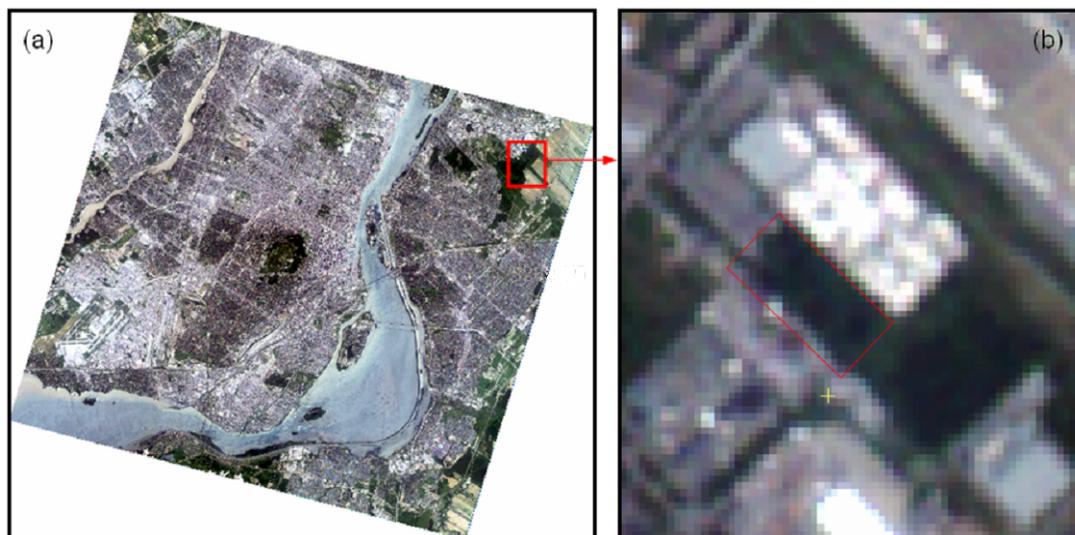


Figure XII-5. Exemple d'un champ agricole bordé de surfaces brillantes dans la bande rouge sur l'image Formosat-2 (vraies couleurs) du 05-06-2005. Coordonnées du lieu : 45° 33' 30" N; 73 ° 25' 30" O.

Pour les huit images Formosat-2 disponibles (acquises les 05, 19, 21, 22, 25, 27, 28 juin et les 02 et 03 juillet 2005), nous avons calculé les NDVIs apparents et extrait les profils selon la largeur du champ (figure XII-6-a). La figure XII-6-b montre que les NDVIs apparents sont très différents même pour des dates séparées par une ou deux journées, ceci est dû à la différence des conditions atmosphériques. On peut voir également les effets d'adjacence sur les profils de NDVI : hormis les pixels mixtes, les pixels des extrémités du champ ont des NDVIs moins élevés que ceux des pixels du centre (figure XII-6-b).

La correction des effets atmosphériques et de l'effet d'adjacence est réalisée par l'inversion de l'équation 7, soit :

$$\rho_{sol} = \frac{(\rho^{sat} - T_{gaz}\rho_{atm})(1 - S_{alb}\rho_{env}) - T_{gaz}T^{\downarrow}t_{dif}^{\uparrow}\rho_{env}}{T_{gaz}T^{\downarrow}t_{dir}^{\uparrow}} \quad (40)$$

La figure XII-7 montre les réflectances apparentes rouge et PIR de la zone d'étude ainsi que les réflectances d'environnement calculées selon les équations 25 à 28, tel qu'expliqué dans la section VII-2.

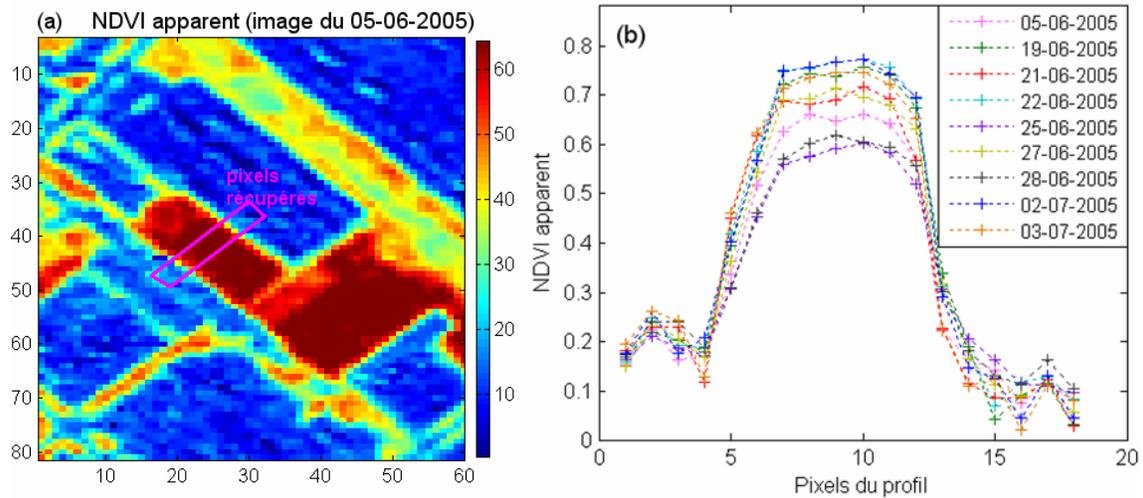


Figure XII-6. Profil du NDVI apparent extrait sur la largeur du champ agricole sélectionné sur les images Formosat-2 utilisées.

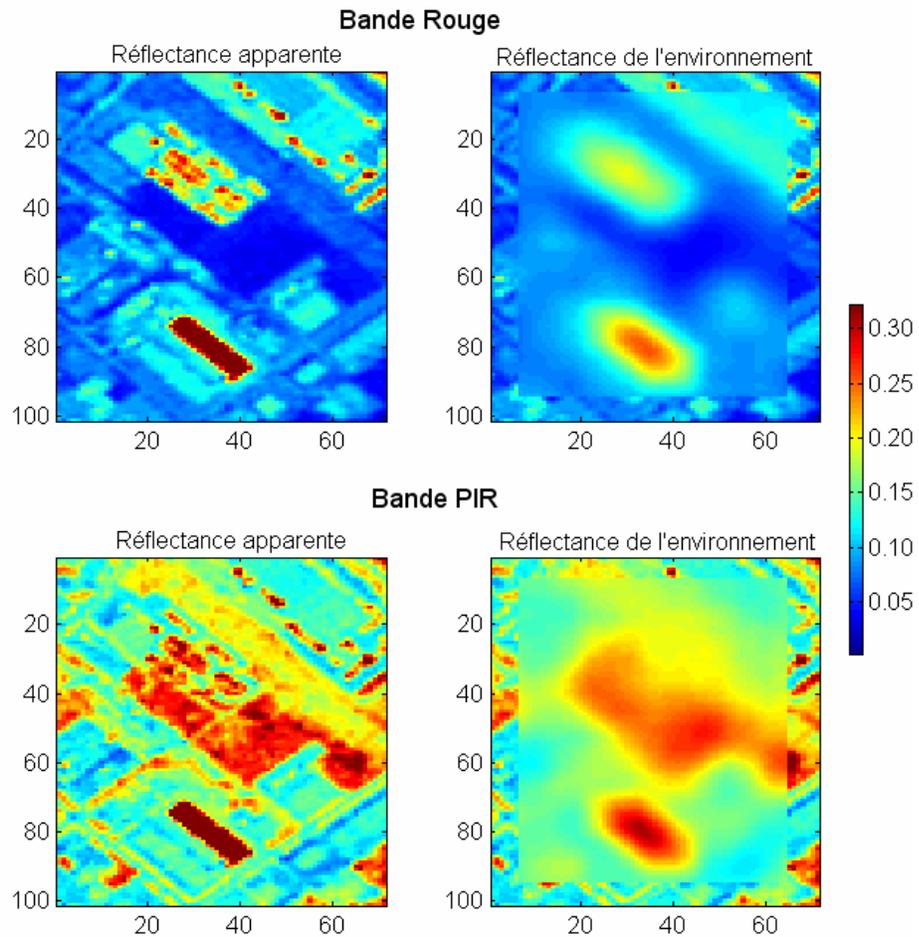


Figure XII-7. Exemple de réflectances apparentes et de réflectances d'environnement dans les bandes rouge et PIR pour le champ agricole sélectionné sur les images Formosat-2 utilisées.

La figure XII-8 illustre les NDVI calculés à partir des réflectances au sol. La correction des effets atmosphériques réduit la sous-estimation par rapport aux NDVI apparents illustrés sur la figure XII-6-b. De plus, la correction de l'effet d'adjacence fait que les pixels des bordures ont des valeurs plus proches de ceux du centre.

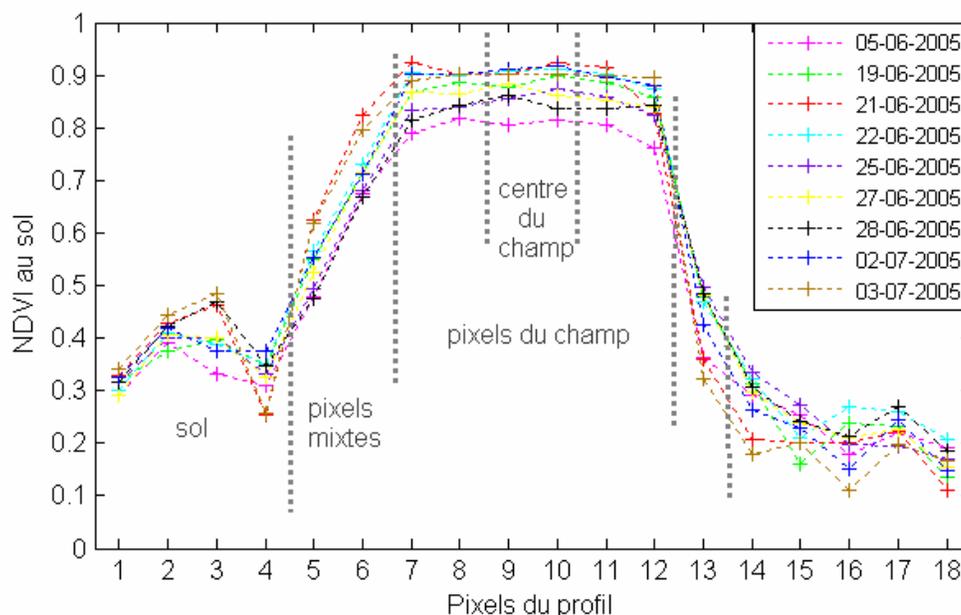


Figure XII-8. Profil du NDVI corrigé extrait sur la largeur du champ agricole sélectionné sur les images Formosat-2 utilisées.

En excluant les pixels de sol (numérotés 1 à 4 et 14 à 18) et les pixels mixtes (numérotés 5, 6 et 13), les différences de NDVI (apparents et corrigés) entre les pixels du champ (17 à 12) par rapport à la moyenne des deux pixels du centre du profil (9 et 10) montrent que les NDVI calculées à partir des images corrigées (NDVI au sol) sont moins affectées par l'effet d'adjacence que le NDVI apparent (tableaux XII-6 et XII-7).

De plus, nous pouvons constater du tableau XII-6 que l'effet d'adjacence est plus important pour les pixels 11 et 12 situés du côté du champ où les réflectances rouges de la surface voisine sont les plus élevées (direction Nord-est, pixels 14 à 18). Pour ces pixels (11 et 12), la correction de l'effet d'adjacence est nettement exprimée par la réduction de la différence entre les NDVI de ces pixels et ceux du centre du champ.

Tableau XII-6. Différences entre les NDVIs apparents des pixels du profil du champ et la moyennes des deux pixels centraux (numérotés 9 et 10).

<b>Pixels du profil</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>05-06-2005</b>	-0.0274	0.0068	-0.0058	0.0058	-0.0112	-0.0850
<b>19-06-2005</b>	-0.0253	-0.0027	-0.0095	0.0095	-0.0072	-0.0717
<b>21-06-2005</b>	-0.0162	-0.0207	-0.0130	0.0130	-0.0109	-0.1338
<b>22-06-2005</b>	-0.0180	-0.0155	-0.0018	0.0018	-0.0134	-0.0771
<b>25-06-2005</b>	-0.0363	-0.0212	-0.0050	0.0050	-0.0136	-0.0769
<b>27-06-2005</b>	-0.0149	-0.0102	0.0092	-0.0092	-0.0250	-0.0710
<b>28-06-2005</b>	-0.0412	-0.0090	0.0067	-0.0067	-0.0182	-0.0550
<b>02-07-2005</b>	-0.0331	-0.0127	-0.0017	0.0017	-0.0268	-0.0753
<b>03-07-2005</b>	-0.0324	-0.0119	-0.0002	0.0002	-0.0240	-0.0918

Tableau XII-7. Différences entre les NDVIs corrigés des pixels du profil du champ et la moyennes des deux pixels centraux (numérotés 9 et 10).

<b>Pixels du profil</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>05-06-2005</b>	-0.0205	0.0088	-0.0047	0.0047	-0.0048	-0.0522
<b>19-06-2005</b>	-0.0215	-0.0032	-0.0099	0.0099	-0.0015	-0.0402
<b>21-06-2005</b>	0.0082	-0.0098	-0.0100	0.0100	0.0025	-0.0910
<b>22-06-2005</b>	-0.0031	-0.0084	-0.0013	0.0013	-0.0052	-0.0412
<b>25-06-2005</b>	-0.0303	-0.0241	-0.0080	0.0080	-0.0051	-0.0432
<b>27-06-2005</b>	-0.0070	-0.0080	0.0110	-0.0110	-0.0208	-0.0388
<b>28-06-2005</b>	-0.0200	-0.0039	0.0128	-0.0128	-0.0119	-0.0227
<b>02-07-2005</b>	-0.0114	-0.0099	-0.0028	0.0028	-0.0125	-0.0402
<b>03-07-2005</b>	-0.0120	0.0007	-0.0010	0.0010	-0.0012	-0.0253

# CHAPITRE XIII - Effet de la topographie sur les applications en milieu forestier

## XIII-1 Estimation de la biomasse forestière

Dans cette section, nous allons réaliser un exemple d'estimation de la biomasse forestière dans le but de voir l'effet de la topographie sur ce genre d'applications. La figure XIII-1 illustre l'image Landsat-7 ETM+ acquise le 08-06-2001 couvrant la région d'Oka dans les Laurentides, Québec ( $45^{\circ} 31' 55''$  N;  $74^{\circ} 02' 57''$  O) ainsi que les paramètres pente et orientation des pixels. La pente du terrain dépasse les  $30^{\circ}$  par endroits (figure XIII-1-c) et les effets topographiques sont visibles sur la figure XIII-1-b.

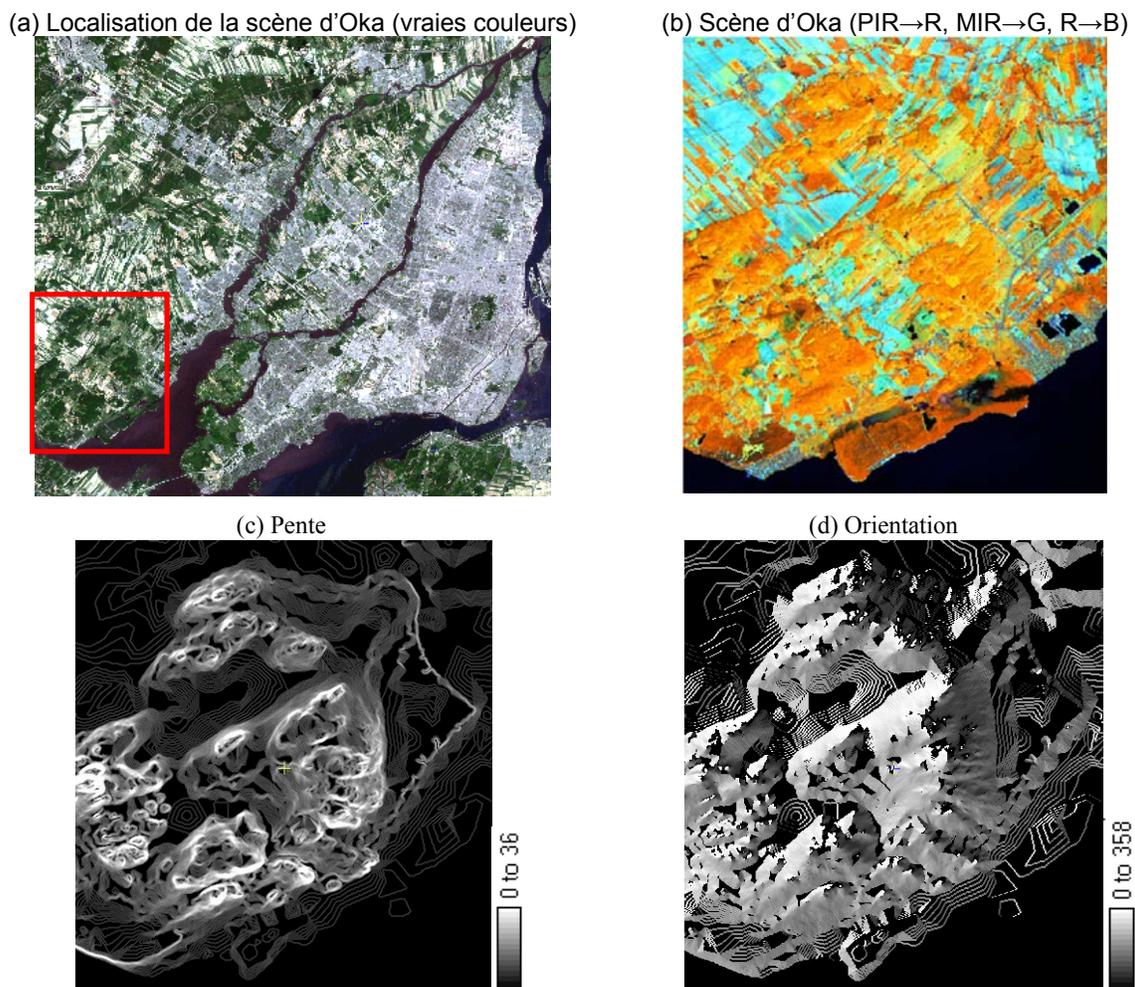


Figure XIII-1. Image Landsat-7 ETM+ (du 08-06-2001) d'Oka utilisée pour le calcul de la biomasse forestière et les paramètres topographiques (pente et orientation) correspondantes.

Pour les pentes supérieures à 10°, les VNs du PIR des pixels orientés vers le soleil sont plus élevées et ceux des pixels orientés dans le sens opposé sont plus faibles par rapport aux pixels d'orientation perpendiculaire à l'azimut solaire et qui subissent très peu les effets topographiques (figure XIII-2). Même si l'effet topographique est peu perçu dans la bande rouge, il est très visible sur les NDVIs définis en fonction des VNs, il est dû à la sensibilité du PIR à ces effets topographiques.

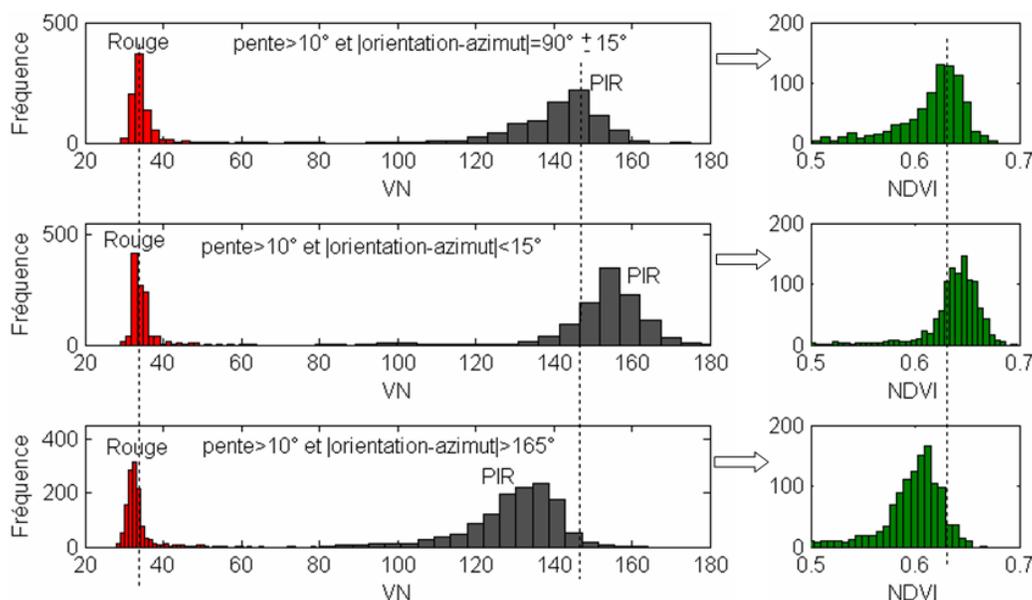


Figure XIII-2. VNs des bandes rouge et PIR et NDVI des pixels inclinés de 10° ou plus et orientés de 0°, 90° ou 180° (±15°) par rapport à l'azimut du soleil. L'image utilisée est la Landsat-7 acquise le 08-06-2001 sur Oka, Laurentides, Québec, illustrée sur la figure XIII-1.

Afin d'estimer la biomasse à partir de l'image satellitale, nous avons utilisé le modèle de Zheng *et al.* (2004) qui nécessite également la connaissance de l'âge des forêts. Cette donnée est disponible dans la carte forestière (figure XIII-3).

De plus, dans le but d'avoir une référence autre que l'image satellitale, nous allons calculer la biomasse à partir de la carte forestière à l'aide du modèle de Fournier *et al.* (2003) qui a été validé par ses auteurs pour le Québec. Dans ce modèle, la biomasse forestière (*AGB* pour « aboveground biomass ») est estimée à partir de la densité  $D$  et la hauteur  $H_a$  des arbres (figure XIII-3) par l'expression :

$$AGB_{carte} = a H_a + b D + c H_a^2 + d D^2 + e H_a D \quad (41)$$

Les coefficients du modèle dépendent des espèces des arbres (tableau XIII-1)

.Tableau XIII-1. Coefficients du modèle de Fournier *et al.* (2003) selon les espèces de forêts.

	a	b	c	d	e
Sapins	5.56	0.586	-0.202	0.000	0.0494
Épinettes	1.58	0.536	0.000	0.0042	0.0358
Feuillus tolérants	0.00	1.599	0.075	-0.0142	0.0565
Feuillus intolérants	0.00	1.058	0.098	-0.0080	0.0460
Forêt mixte	2.11	0.975	-0.023	-0.0062	0.0530

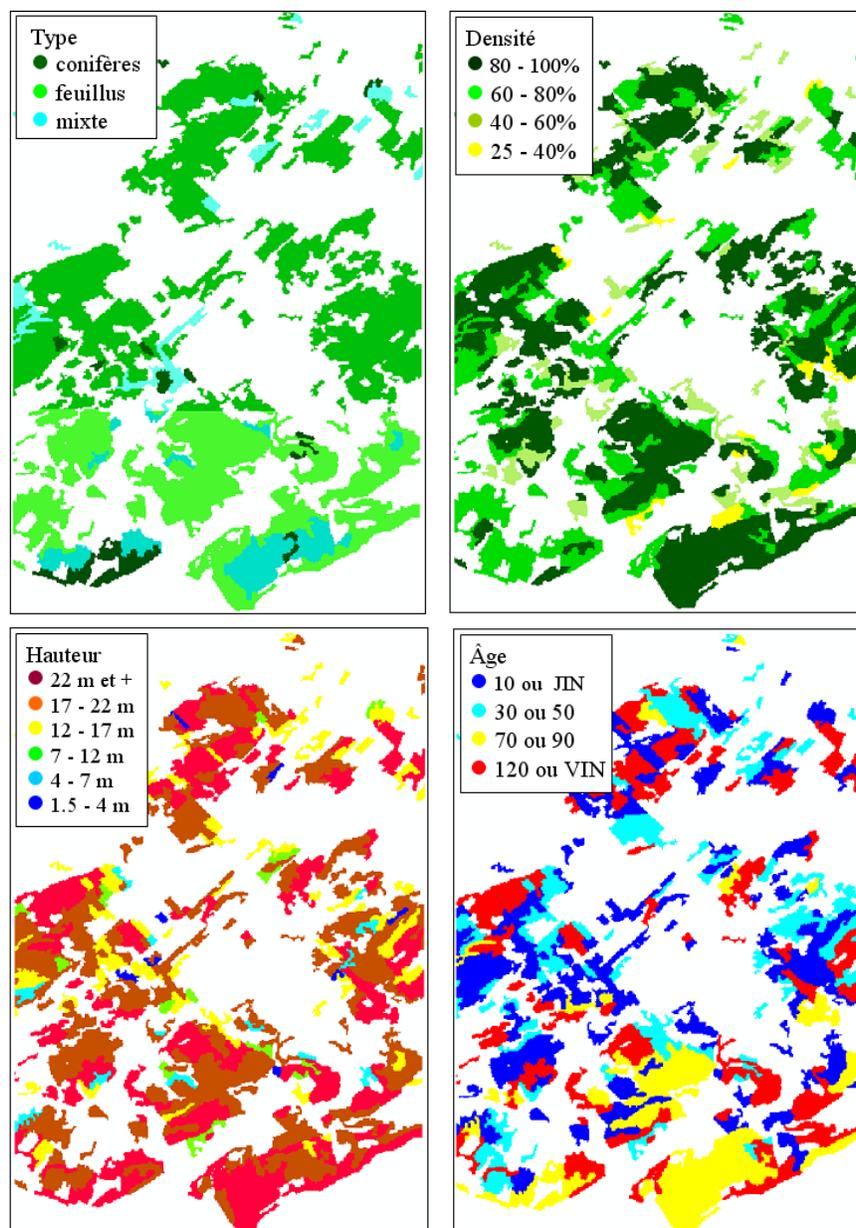


Figure XIII-3. Données de la carte forestière couvrant la région d'Oka, Laurentides, Québec. Les codes JIN et VIN dans la légende correspondent aux désignations « jeune inéquienne » (origine < 80 ans) et « vieux inéquienne » (origine > 80 ans), respectivement.

La biomasse estimée par le modèle de Fournier *et al.* (2003) est représentée sur la carte de la figure XIII-4.

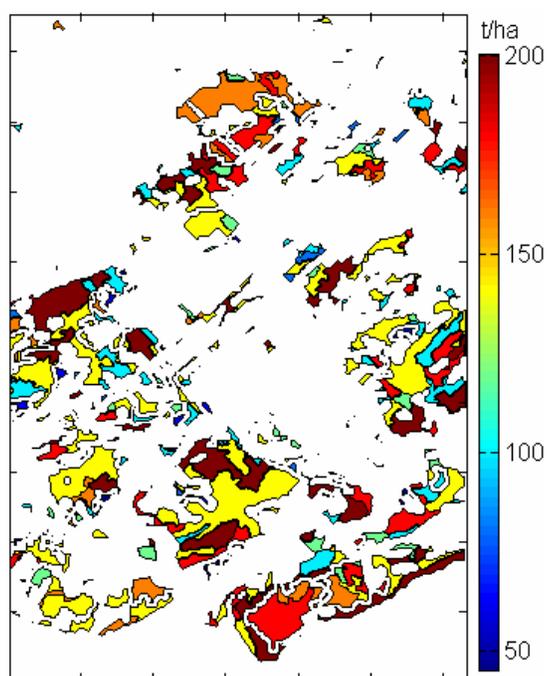


Figure XIII-4. Biomasse forestière estimée à partir de la carte forestière par le modèle de Fournier *et al.* 2003.

Le modèle de Zheng *et al.* (2004) permet de calculer la biomasse (AGB) à partir de la réflectance PIR ( $\rho_{\text{PIR}}$  calculé par REFLECT à partir de l'image Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001) et de l'âge des arbres par l'expression :

$$AGB_{ETM+} = c_1 \rho_{\text{PIR}} + c_2 \text{Age} + c_3 \quad (42)$$

Les coefficients originaux proposés par Zheng *et al.* (2004) ont été calculés pour des forêts du Wisconsin, USA, et ne donnent pas des valeurs comparables à l' $AGB_{\text{carte}}$  calculée par le modèle de Fournier *et al.* (2003). Ainsi, nous avons gardé la formulation du modèle de Zheng *et al.* (2004) et recherché les coefficients qui donnent les valeurs de  $AGB_{ETM+}$  les plus proches de  $AGB_{\text{carte}}$ , mais en ne considérant que les zones de faible pente ( $<4^\circ$ ). Le modèle devient :

$$AGB_{ETM+} = 60.874 \rho_{\text{PIR}} + 0.315 \text{Age} + 106.15$$

La moyenne de la biomasse forestière par pixel a été calculée à l'aide des deux modèles (Zheng modifié et Fournier) pour les conditions topographiques qui révèlent habituellement les sur-estimations et les sous-estimations. Dans le cas du modèle de Zheng *et al.* (2004) la

réflectance PIR a été calculée avec et sans corrections topographiques. Le tableau XIII-2 montre que les corrections topographiques avec le principe des pentes équivalentes permettent de réduire la surestimation dans le cas des surfaces orientées vers le soleil. Pour l'ensemble des zones forestières étudiée, la corrélation entre  $AGB_{ETM+}$  et  $AGB_{carte}$  est de 0.69 lorsque les corrections topographiques sont appliquées et de 0.66 dans le cas contraire.

Tableau XIII-2. Comparaison de la biomasse moyenne par pixel calculée à partir de la carte (modèle de Fournier *et al.* 2003) et de l'image ETM+ du 08-06-2001 (modèle de Zheng *et al.* 2004) pour quatre conditions topographiques.

Conditions topographiques	Modèle de Fournier	Modèle de Zheng adapté	
		Sans cor. topo.	Avec cor. topo.
Pente < 4°	158.02	158.97	158.87
Pente > 10° ;  orientation-azimut  < 10°	167.82	182.77	165.92
Pente > 10° ;  orientation-azimut  = 90 ± 10°	150.48	145.10	145.11
Pente > 10° ;  orientation-azimut  > 170°	171.19	166.67	167.98

## XIII-2 La classification en milieu forestier

### XIII-2-1 Les plans bleu-vert et rouge-PIR

Nous avons utilisé les mêmes combinaisons de réflectances faibles, moyennes et élevées utilisées au point XI-2-1 afin de simuler les effets topographiques sur les réflectances apparentes. Nous pouvons voir sur la figure XIII-5 que les réflectances apparentes sont surestimées lorsque les surfaces inclinées sont orientées vers le soleil et fortement sous-estimées lorsque les surfaces sont orientées à l'opposé de l'azimut solaire. Comme pour les effets atmosphériques, les effets topographiques ne changent pas significativement les distances spectrales relatives entre les différents points de l'espace spectral. Toutefois, contrairement aux effets atmosphériques, les conditions topographiques sont très variables dans l'espace et peuvent même être très différentes d'un pixel à l'autre. Nous pouvons donc prédire que les effets topographiques auront plus d'impact sur la classification que les effets atmosphériques. Ces calculs ont été réalisés avec le modèle validé pour les surfaces lisses. Pour les forêts on s'attendrait à ce que les surfaces à l'opposé du soleil ne soient pas autant affectées par les effets topographiques (voir chapitre IX)

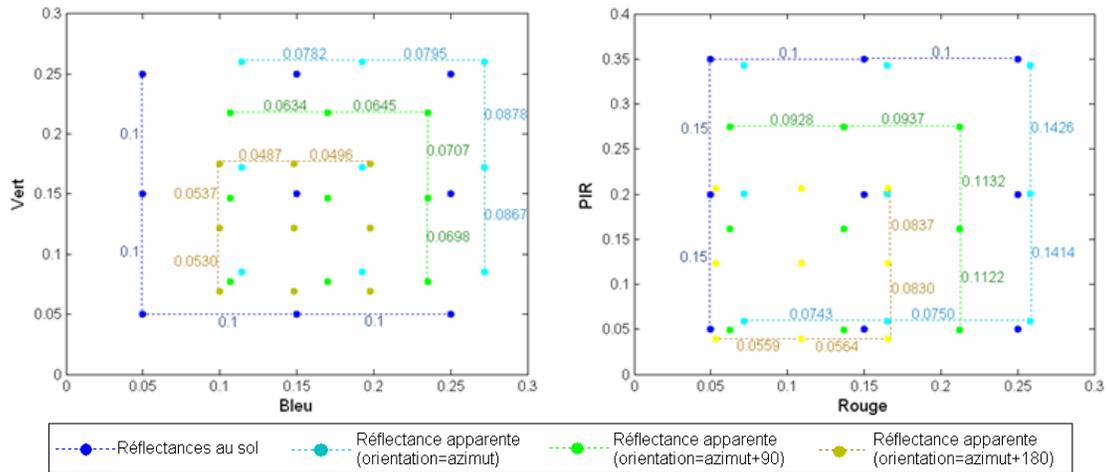


Figure XIII-5. Effets de la topographie sur les plans bleu-vert et rouge-PIR pour trois orientations de la surface inclinée. Les autres conditions sont fixées à : AOD=0.1, pente=30°,  $H = 100$  m,  $H_r = 40\%$ ,  $\theta_s = 25^\circ$  et  $\varphi_s = 130$ .

### XIII-2-2 Simulation de l'effet de la topographie sur la classification

Cette section discute l'influence de trois conditions d'éclairage sur la classification d'une image simulée constituée des huit matériaux utilisés dans l'exemple de la section XI-2-2. Les conditions d'éclairage sont : (1) un terrain plat, (2) un terrain incliné de  $20^\circ$  faisant face au soleil et (3) un terrain incliné de  $20^\circ$  orienté au à l'opposé de l'azimut du soleil. L'angle zénithal du soleil est fixé à  $18^\circ$ , ce qui correspond à un soleil haut.

La classification de l'image affectée par la topographie montre une confusion entre les classes dont les signatures spectrales sont proches, à savoir le gazon, les feuillus et les conifères (données non présentées). Puisque nous avons choisi une hauteur du soleil élevée, les autres classes restent séparables. Ainsi, même si les conditions topographiques que nous avons choisies ne sont pas extrêmes (soleil haut et pente moyenne), elles ont suffi à diminuer la séparabilité des classes proches en terme de signature spectrale (gazon, feuillus et conifère).

### XIII-2-3 Classification en milieu forestier – relation bande PIR et densité des forêts

Dans l'image Landsat-7 ETM+ du 08-06-2001 utilisée pour le calcul de la biomasse (à la section XIII-1), nous avons sélectionné les pixels de forêt qui ont des pentes supérieures ou égales à  $10^\circ$  et réalisé une classification automatique avec l'algorithme k-means pour les réflectances au sol (dans l'espace rouge-PIR) calculées avec REFLECT avec et sans

corrections topographiques. Nous avons également calculé à l'aide de la méthode de Fournier *et al.* (2003) la biomasse pour les pixels sélectionnés, et ce afin de comparer les classes issues des bandes rouge et PIR de l'image ETM+ et la biomasse estimée à partir de la carte.

Les zones pointées par des flèches sur la figure XIII-6 montrent que pour une biomasse ( $AGB_{carte}$ ) similaire (figure XIII-6-a), se trouvant sur les mêmes types de peuplements (voir figure XIII-3), si les pixels sont orientés vers le soleil (figure XIII-6-b), ils sont classifiés dans des classes très différentes si l'on ne tient pas compte des effets topographiques (figure XIII-6-c). Lorsque les corrections topographiques sont appliquées, les pixels correspondant à des biomasses similaires sont attribués à des classes plus proches (figure XIII-6-d) même s'ils ont des orientations différentes.

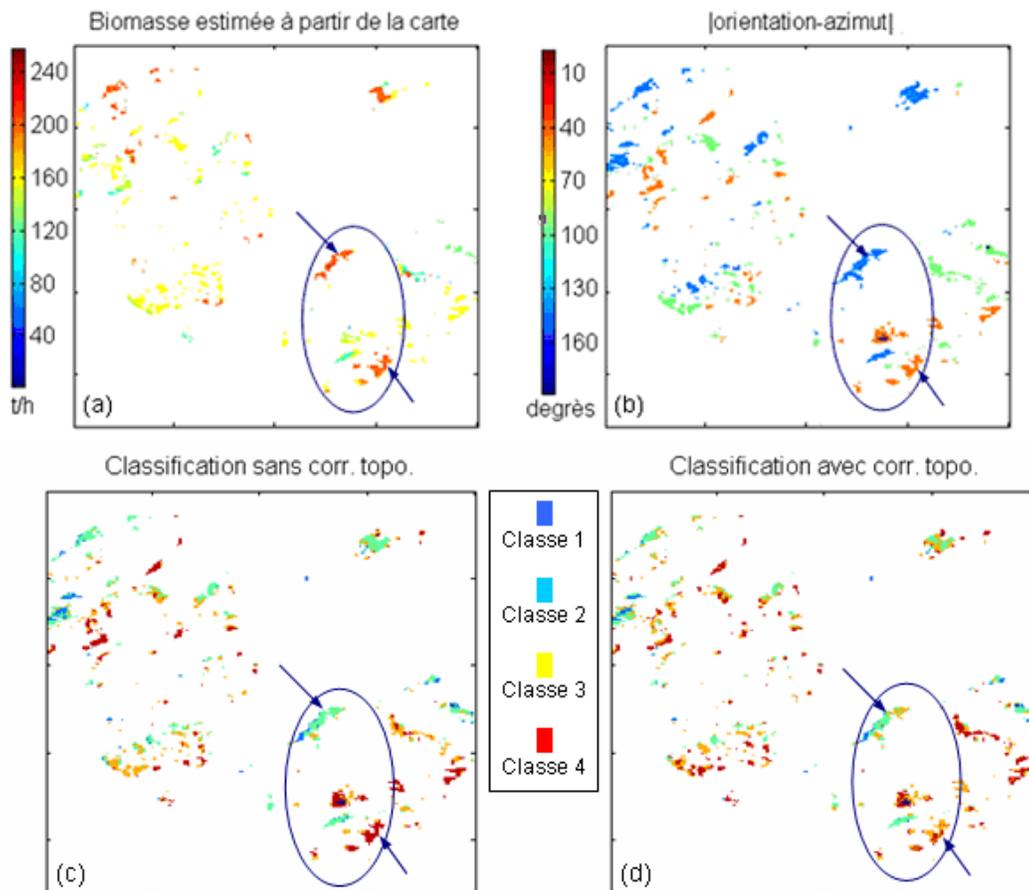


Figure XIII-6. Classification des pixels de la forêt d'Oka se trouvant sur des terrains inclinés ( $>10^\circ$ ) sur l'image Landsat-7 du 08-06-2001 à partir des réflectances rouge et PIR calculées avec et sans corrections topographiques. Les classes 1 à 4 correspondent respectivement à des valeurs de réflectance PIR sans correction topographique de 0.376, 0.467, 0.519 et 0.574 et de 0.358, 0.455, 0.502 et 0.5440 avec correction topographique.

## CHAPITRE XIV – Synthèse des résultats et conclusion

Les objectifs de cette thèse étaient de réaliser un outil de restitution de la réflectance au sol et de l'utiliser afin d'étudier les effets radiométriques liés aux conditions d'éclairement et de visée, au type de capteur et aux conditions atmosphériques sur les applications des images de télédétection. Pour ce faire, nous avons développé une nouvelle version du logiciel REFLECT qui permet de calculer les paramètres liés à tous ces aspects et de réaliser ainsi deux opérations: 1) la simulation des réflectances apparentes au niveau du satellite telles qu'influencées par les conditions atmosphériques et topographiques afin d'examiner la modification des réflectances réelles par ces effets et 2) la restitution des réflectances au sol dans le but d'évaluer l'importance de leur utilisation plutôt que celle des VN dans diverses applications des images satellitales multispectrales à haute et très haute résolution spatiale.

Nous avons réalisé une nouvelle version du logiciel REFLECT développé à l'origine par Cavayas (2003). Les améliorations apportées concernent :

- L'intégration d'un modèle d'aérosols plus récent (OPAC) qui prend en compte l'effet de l'humidité de l'air sur les propriétés des aérosols de type « water soluble ».
- La proposition d'une loi d'extrapolation de l'AOD à 550 nm aux autres longueurs d'onde mieux adaptée au territoire d'étude et qui a été établie à partir des données mesurées sur des sites situés près de Montréal.
- La prise en compte de l'effet d'adjacence à l'aide d'un modèle inspiré du modèle de Phong.
- L'amélioration de la recherche des cibles obscures pour l'estimation de l'AOD à partir de l'image à corriger, la possibilité de subdiviser l'image et le choix semi-automatique du critère d'« obscurité » des cibles.
- L'extension de REFLECT à la majorité des capteurs multispectraux à haute résolution (Landsat-4 et -5 TM, Landsat-7 ETM+, tous les HR de SPOT 1 à 5, ASTER, EO-1 ALI) et très haute résolution (QuickBird et Ikonos) utilisés actuellement.
- La prise en compte de l'angle de visée et de la courbure de la terre.

- Les corrections topographiques pour les surfaces lisses à l'aide d'un modèle qui sépare les composantes directe et diffuse du rayonnement solaire que nous avons adapté à la formulation du code 6S. Le modèle a également été adapté à la canopée forestière au moyen du principe des pentes équivalentes.
- La réduction des temps de traitement dans le cas des corrections radiométriques des images de grande taille à l'aide de la génération de LUTs internes de paramètres atmosphériques et leur utilisation pour corriger l'ensemble des pixels de l'image. Le temps nécessaire pour la correction d'une image (4 bandes spectrales) de 3000 par 3000 pixels est d'environ 15 minutes avec les moyens informatiques actuels.

Les principaux apports de cette recherche dans le volet « développement », qui concerne la méthodologie de restitution de la réflectance au sol implémentée dans REFLECT ainsi que leur pertinence sont résumés dans le tableau XIV-1.

Les travaux de validation ont montré que la restitution de la réflectance au sol par REFLECT se fait avec une bonne précision : la variabilité de cette réflectance entre différentes dates (conditions atmosphériques) et différents capteurs (Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, SPOT 1 HRV et SPOT 5 HRG) est de l'ordre de  $\pm 0.01$  unités de réflectance pour toutes les bandes spectrales (visible, PIR et MIR). Ces résultats ont été obtenus avec 12 images dont les VNs sont très variables selon les capteurs (gains) et, à un degré moindre, selon les conditions atmosphériques définies essentiellement par la valeur de l'AOD.

L'erreur de restitution de la réflectance au sol par rapport à des mesures ASD (réalisées sur des surfaces de  $1 \text{ m}^2$ ) est d'environ 10% (bandes du visible et PIR). Cette erreur a été réduite de moitié par rapport à ce qu'on avait obtenu en utilisant l'ancienne version de REFLECT avec les mêmes données.

En focalisant davantage sur la correction des effets topographiques, l'application du modèle proposé dans REFLECT à des surfaces inclinées planes (toitures inclinées) dans une image Ikonos a permis de réduire une erreur d'environ 0.1 unités de réflectance (obtenue sans correction topographique) à 0.01 unités de réflectance.

Le modèle de correction topographique adapté aux canopées forestières nous a permis de réduire l'erreur de restitution de la réflectance au sol de la bande PIR d'une image SPOT pour une surface de forêt orientée vers le soleil de 0.08 unités de réflectance (sans correction topographique) à moins de 0.02 unités de réflectance.

Tableau XIV-1. Résumé des améliorations apportées au logiciel REFLECT.

<b>Intervention</b>	<b>Apport</b>	<b>Pertinence</b>
Intégration de OPAC	Prise en compte de l'effet de l'humidité de l'air sur les propriétés des aérosols	Pour l'estimation de l'AOD
Loi d'interpolation AOD( $\lambda$ )	Correction de la surestimation de l'AOD dans les bande bleue et MIR	Surtout pour les applications utilisant les bandes bleue et MIR.
Recherche des cibles obscures	- Détection sur l'ensemble de l'image grâce à la subdivision - Méthode automatique et semi-automatique avec choix du degré de sévérité qui permet d'éviter les fausses détections	Suivi de la variabilité spatiale de l'AOD Meilleure précision dans le calcul de l'AOD
AOD issu des cibles obscures	Meilleure solution pour disposer de l'AOD que les autres possibilités (mesure, AERONET, MODIS, visibilité). AOD au moment et à l'endroit de l'image	Important dans tous les cas
Composante spéculaire dans l'effet d'adjacence	Prise en compte, pixel par pixel, des composantes lambertienne et spéculaire dans la correction de l'effet d'adjacence à l'aide du modèle de Phong.	Important dans les cas particuliers de cible sombre entourée de cible brillante, notamment pour les champs agricoles entourés de sol nu.
Angle de visée	Prise en compte de la visée hors nadir pour les calculs des effets atmosphériques.	Dans les cas des capteurs à visée oblique.
Modèle de corrections topographiques pour surfaces lisses et la canopée forestière	Modèle basée sur la séparation des composantes directe et diffuse et adapté à la formulation du code 6S, plus la proposition du principe des pentes équivalentes pour la canopée forestière.	Dans les cas des terrains inclinés.
Reflect_rapide	Calcul de LUTs internes de paramètres atmosphériques	Réduction considérable du temps de calcul.

Le logiciel REFLECT (notamment l'option de génération de paramètres liés au soleil, au capteur et à l'atmosphère, voir section IV-2-6) nous a servi à réaliser des simulations de réflectances apparentes correspondant à différentes conditions atmosphériques (AOD, humidité relative, altitude du terrain) et topographiques (pentes et orientations) et de les comparer aux réflectances au sol dans le but de quantifier les modifications (bruits) introduites par chacune de ces conditions au signal utile qui est la réflectance au sol. Des simulations de l'effet d'adjacence pour des conditions similaires aux applications des images pour l'agriculture ont également été réalisées. Ces simulations nous ont permis de voir à quel point les bruits atmosphériques et topographiques déforment le signal utile.

REFLECT a également été utilisé pour évaluer l'importance de l'utilisation des réflectances au sol par rapport à l'utilisation des images brutes (VNs) pour diverses applications courantes de la télédétection dans les domaines des classifications, du suivi des changements nécessitant plusieurs images, de l'agriculture et de la foresterie.

Tous les résultats liés aux applications (simulations ou avec images réelles) sont synthétisés dans le tableau XIV-2. Dans la majorité des applications (suivi des changements par images multi-dates, utilisation d'indices de végétation, estimation de paramètres biophysiques, ...), la restitution des réflectances au sol est une opération cruciale pour obtenir des résultats fiables. L'exception étant la classification pour laquelle nous avons observé que les corrections atmosphériques apportent certes certaines améliorations quant à la séparabilité des classe, mais cette amélioration est moins générale et moins évidente à prouver par rapport à ce qui a été trouvé pour les autres applications. Les raisons probables sont que (i) les effets atmosphériques préservent (à un certain degré) les distances relatives dans l'espace vectoriel des bandes spectrales et (ii) la variabilité spatiale des conditions atmosphériques est généralement faible pour une même image.

Tableau XIV-2 Synthèse des résultats sur l'effet des conditions atmosphériques et topographiques sur la qualité des informations extraites des images de télédétection.

Type d'application	Importance des corrections	Erreurs commises en l'absence de corrections
<i>Simulation de la réflectance apparente selon les conditions atmosphériques</i>		
Effet de l'AOD : ciel clair (AOD 0.05) à ciel brumeux (AOD=0.6)	Pour les bandes du visible, notamment la bande bleue	Faibles réflectances augmentées de 0.1 à 0.2 et réflectances élevées réduites de 10 à 40%
Altitude du lieu $H$ (proche de 1000 m)	Seulement si supérieure à plusieurs centaines de mètres	Effet additif réduit de 0.1 et effet multiplicatif réduit de 7%
Humidité de l'air	Seulement PIR et MIR	Réduit de 10% les réflectances élevées si $H_r$ passe de 20 à 80%
<i>Simulation de la réflectance apparente pour plusieurs conditions topographiques</i>		
Surfaces inclinées lisses en face du soleil	Toutes les bandes, mais plus pour PIR et MIR, où le diffus est moins important	Surestimation à cause de $\cos(\theta_s)$ appliqué dans les corrections atmosphériques en supposant que la surface est horizontale
Surfaces inclinées lisses contre le soleil	Toutes les bandes spectrales	Sous estimation très importante (>50%) si la pente est élevée (rayons solaires rasants)
<i>Effet de l'atmosphère et du type de capteur sur les classifications</i>		
Dirigée	Rétrécit l'espace des signatures spectrales et diminue la discriminabilité des classes	Peut affecter les résultats pour les classes spectralement proches
Non dirigée		
<i>Pour les applications en agriculture</i>		
Effet de l'atmosphère (AOD) sur les VIs	Sous-estime tous les VIs sauf le SARVI qui est parfois surestimé	De 10% (ciel clair) à plus de 30% (ciel brumeux).
Effet de l'AOD sur l'estimation du LAI	Sous-estimation importante	De 20% (ciel clair) à environ 50% (ciel brumeux)
Effet de $H_r$ sur les VIs	Bandes PIR et MIR (raies d'absorption de $H_2O$ )	Jusqu'à 10% de sous-estimation supplémentaire
Effet d'adjacence sur l'observation des cultures	Pixels des bordures d'une couverture végétale entourée de sol nu (très réfléchissant dans le rouge)	Sous-estimation supplémentaire de 0.05 à 0.1 (unités de NDVI), selon l'AOD (0.05 à 0.6, resp.).
<i>Effets de la topographie sur les applications en milieu forestier</i>		
Estimation de la biomasse à partir du PIR	Pixels faisant face du soleil	Surestimation de plus de 10% à cause de la surestimation du PIR
Classification	Pixels faisant face du soleil	Erreurs de classification à cause de la surestimation du PIR

Ainsi, si on revient sur les hypothèses de départ quant à l'importance des corrections radiométriques et au moyen de les réaliser, nous pouvons affirmer que l'approche physique basée sur un code atmosphérique (le 6S en l'occurrence) offre une méthode fiable pour prendre en compte tout les facteurs parasites (conditions d'éclairement et d'observation, atmosphère, topographie, propriétés du capteur) définissant les valeurs numériques des images satellitale afin de restituer l'information utile qui est la réflectance réelle de l'objet visé.

Parmi ces facteurs parasites, l'effet de l'atmosphère est celui qui est le moins facile à corriger, notamment à cause de la variabilité des aérosols et de l'absence de mesures de leur épaisseur optique. La recherche a montré que la méthode des cibles obscures donne des valeurs fiables d'AOD. Toutefois, cette méthode de recherche des pixels correspondant aux cibles obscures (basée sur un seuillage d'histogrammes) peut donner des résultats aberrants (surestimation de l'AOD). Ceci nous a mené à proposer un processus de contrôle de qualité : la visualisation du masque ces cibles obscures peut indiquer la nécessité de réaliser une subdivision et/ou un ajustement manuel des seuils de manière à éviter les omissions dans les zones brumeuses de l'image et les fausses détections notamment les ombrages des nuages.

La dernière partie de cette thèse nous a permis de montrer la véracité des hypothèses qui concernent l'importance de l'utilisation des images en réflectance plutôt que les images brutes pour les diverses applications de la télédétection.

Il est possible de compléter ce travail et de l'enrichir. Nous proposons pour ce faire les perspectives suivantes :

- En ce qui concerne la réflectivité du sol, il serait intéressant d'inclure une librairie de fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (FDRB), particulièrement utile dans le cas des capteurs à très haute résolution spatiale, pour lesquels l'effet de moyennage des réflectances des surfaces est moins présent. Ceci permettrait de mieux prendre en compte l'effet des angles de visée élevés.
- Afin de mieux démontrer l'effet de l'humidité de l'air sur l'épaisseur optique des aérosols, des mesures horaires d'AOD au cours de la même journée permettraient de suivre la variation

de  $H_r$  (généralement élevé le matin et faible au milieu de l'après-midi) et son effet sur l'AOD, sachant que celui-ci devrait rester plus ou moins stable en l'espace de quelques heures.

- Ajouter d'autres types de modèles d'atmosphère, en terme de composition d'aérosol (tels que urbain et continental) ou de profils de distribution des particules (tel que MIDSUM) pour adapter REFLECT à d'autres régions géographiques.

- Compléter REFLECT avec les nouveaux capteurs multispectraux HR et VHR (tels que IRS-P6 LISS-II et AWiFS, DEIMOS-1, RapidEye, THEOS, TopoSat) et ceux annoncés pour l'avenir proche (tel que Pleiades-HR).

- Étendre REFLECT aux capteurs hyperspectraux (tel que EO-1 Hyperion).

- En milieu urbain, il serait intéressant de prendre en compte les gaz atmosphériques issus des sources exogènes (pollution).

- Tenter de corriger les effets des nuages translucides de type cirrus par une modélisation de la diffusion non sélective, sinon, essayer de les masquer en détectant leur signature sur des cibles obscures où leur effet additif est élevé même dans les bandes PIR et MIR, contrairement aux aérosols.

- Pour le modèle de correction topographique proposé, il faudrait trouver un moyen de distinguer la rugosité du milieu (surface lisse ou forêt) afin de déterminer le facteur  $\kappa$  utilisé pour le calcul des pentes équivalentes.

- Dans le modèle de correction de l'effet par le modèle spéculaire de Phong, l'estimation de  $k_s$ ,  $k_d$  et  $n$  pourrait être effectuée à partir de données précises (images de bonne résolution spatiale et radiométrique, tel que Formosat-2)

Nous espérons enfin que cette recherche a contribué à sensibiliser les utilisateurs des images satellitaires à l'importance de l'opération de correction radiométrique et à leur offrir un outil pratique pour réaliser ces corrections.

## RÉFÉRENCES

- Adler-Golden S.M., M.W. Matthew, L.S. Bernstein, R.Y. Levine, A. Berk, S.C. Richtsmeier, P.K. Acharya, G.P. Anderson, G. Felde, J. Gardner, M. Hoke, L.S. Jeong, B. Pukall, J. Mello, A. Ratkowski and H.-H. Burke, 1999, Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery based on MODTRAN4, SPIE proceedings, Imaging Spectrometry V, Volume 3753, pp. 61-69.
- Ahern F.J., D.G. Goodenough S.C. Jain, V.R. Rao and G. Rochon, 1977-a, Landsat atmospheric corrections at the CCRS, Proceedings of the 4<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, Quebec City, May 1977, pp. 583–595.
- Ahern F.J., D.G. Goodenough S.C. Jain, V.R. Rao and G. Rochon, 1977-b, Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, MI, pp. 731-755..
- Ahern, F.J., P.M. Teillet and D.G. Goodenough, 1979, Transformation of Atmospheric and Solar Illumination Conditions on the CCRS Image Analysis System, Proceedings of the 5<sup>th</sup> Purdue Symposium on Machine Processings of Remotely Sensed Data, Indiana, June 1979, pp. 34 52.
- Alter-Gartenberg R., S.R. Nolf and R.E. Davis, 2002, A sensitivity assessment of terrestrial identification in remote sensing, *Int. J. Remote Sens.*, 23(5): 825-849.
- Anderson, G.P., A. Berk, P.K. Acharya, M.W. Matthew, L.S. Bernstein, J.H. Chetwynd, H. Dothe, S.M. Adler-Golden, A.J. Ratkowski, G.W. Felde, J.A. Gardner, M.L. Hoke, S.C. Richtsmeier and L.S. Jeong, 2001, MODTRAN4, version 2: Radiative transfer modeling, SPIE proceedings, Volume 4381, pp. 455-459.
- Aubé, M., 2003, Modélisation de l'évolution spatiale et temporelle de l'épaisseur optique des aérosols à l'échelle régionale, Thèse de doctorat, département de géographie et télédétection, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke.
- Bannari A., D. Morin et D. Haboudane, 2002, Analyse des effets atmosphériques sur les indices de vegetation en milieu urbain, *Télédtection*, 1(1): 19-46.

Berk A., G.P. Anderson, L.S. Bernstein, P.K. Acharya, H. Dothe, M.W. Matthew, S.M. Adler-Golden, J.H. Chetwynd, S.C. Richtsmeier, B. Pukall, C.L. Allred, L.S. Jeong and M.L. Hoke, 1999, MODTRAN4 Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction, SPIE proceedings, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III, Volume 3756, pp. 348-353.

Blesius L. and F. Weirich, 2005, The use of the Minnaert correction for land-cover classification in mountainous terrain, *Int. J. Remote Sens.*, 26(17): 3831-3851.

Bokoye A.I., A. Royer, N.T. O'Neill, P. Cliché, G. Fedosejevs, P.M. Teillet and L.J.B. McArthur, 2001, Characterisation of atmospheric aerosol across Canada from a ground-based sunphotometer network: AEROCAN, *Atmosphere-Ocean*. 39(4): 429-456.

Bouroubi M.Y., N. Tremblay, P. Vigneault et F. Cavayas, 2005, Algorithme de correction des images satellitaires multispectrales fondé sur le code 6S et la méthode des cibles obscures, 12<sup>e</sup> congrès de l'Association québécoise de télédétection, Saguenay, Québec, mai 2005.

Bouroubi M.Y., P. Vigneault, F. Cavayas et N. Tremblay, 2006, Le Progiciel « REFLECT » pour la correction atmosphérique d'images satellites : Validation sur la Montérégie, Québec. *Télédétection*, 6(1): 1-8.

Carlson T.N and D.A. Ripley, 1997, On the relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index, *Remote Sens. Environ.*, 62(3): 241-252.

Cavayas F., G. Rochon et P.M. Teillet, 1984, Estimation des réflectances bidirectionnelles par analyse des images Landsat: problèmes et possibilités de solution, 8<sup>ème</sup> symposium canadien de télédétection, 1984.

Cavayas F. and P.M. Teillet, 1985, Geometric model simulations of conifer canopy reflectance, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Les Arcs, France, December 1985, pp. 183-189.

Cavayas F., 1987, Modelling and correction of topographic effect using multi-temporal satellite images, *Canad. J. Remote Sens.*, 13(2): 49-67.

Cavayas, F., Bouroubi M.Y., Vigneault, P. et Tremblay, N., 2003, Algorithme de correction d'images ETM+ de Landsat-7 fondé sur le code atmosphérique 6S et la méthode des cibles

obscures, *25<sup>e</sup> Symposium canadien sur la télédétection : « De l'image à l'information »*, Montréal, Québec, octobre 2003.

Cavayas F., 2003, Correction radiométrique des images satellites, Rapport Interne, Laboratoire de télédétection, Département de Géographie, Université de Montréal, 520 chemin de la Côte-Ste-Catherine, Montréal, Québec, Canada H2V 2B8, 75 p..

Chavez P.S., 1996, Image-based atmospheric corrections – revised and improved, *Photogramm. Eng. and Remote Sens.*, 62: 1025-1036.

Chen R.M. and J. Cihlar, 1996, Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM Images, *Remote Sens. Environ.*, 55(2): 153-162.

Chen X., L. Vierling and D. Deering, 2005, A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time, *Remote Sens. Environ.* 98: 63-79.

Chu D.A., Y.J. Kaufman, C. Ichoku, L.A. Remer, D. Tanré and B. Holben, 2002, Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land, *Geoph. Res. Lett.* 29(12): 1-4.

Civco D.L., 1989, Topographic normalisation of Landsat Thematic Mapper digital imagery, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 55: 1303-1309.

Costa, M.J., A.M. Silva and V. Levizzani, 2004, Aerosol characterization and direct radiative forcing assessment over the ocean. Part I: Methodology and sensitivity analysis, *J. Appl. Meteorol.*, 43(12): 1799-1817.

Crippen R.E., 1987, The regression intersection method of adjusting image data for band rationing, *Int. J. Remote Sens.*, 8(2): 137-155.

Dana R.W., 1982, Background reflectance effects in Landsat data, *Appl. Opt.*, 21: 4106-4111.

Davi H., K. Soudani, T. Deckx, E. Dufrene, V. Le Dantec and C. François, 2006, Estimation of forest leaf area index from SPOT imagery using NDVI distribution over forest stands *Int. J. Remote Sens.*, 27(5): 885-902.

Deschamps P.Y., M. Herman et D. Tanré, 1981, Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres. Modélisation et possibilités de correction, Colloque de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection, Avignon, France, pp. 543-558.

Diner D.J., J.V. Martonchik, E.D. Danielson and C.J. Bruegge, 1988, Application of 3-D radiative transfer theory to atmospheric correction of land surface images, Proceedings of the IGARSS 88 symposium, Edinburgh, Scotland, 13-16 september 1988, pp. 1215-1218.

Dubovik O. and M.D. King, 2000, A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements, *J. Geoph. Res.* 105(D16): 673-696.

Dubovik O., A. Smirnov, B.N. Holben, M.D. King, Y.J. Kaufman, T.F. Eck and I. Sulter, 2000, Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky radiance measurements, *J. Geoph. Res.*, 105(D8): 9791-9806.

Dubovik O., B. Holben, T.F. Eck, A. Smirnov, Y.J. Kaufman, M.D. King, D. Tanré and I. Slutsker, 2002, Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in world wide locations, *J. Atmos. Sciences.*, 59(3): 590-608.

Duggin M.J., 1985, Factors limiting the discrimination and quantification of terrestrial features using remotely sensed radiance, *Int. J. Remote Sens.*, 6(1): 3-27.

Ekstrand S., 1994, Assessment of Forest Damage with Landsat TM: Correction for Varying Forest Stand Characteristics, *Remote Sens. Environ.*, 47(3): 291-302.

Ekstrand S., 1996, Landsat TM-Based Forest Damage Assessment: Correction for Topographic Effects, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 62(2): 151-161.

Fassnacht S., S.T. Gower, M.D. MacKenzie, E.V. Nordheim and T.M. Lillesand, 1997, Estimating the Leaf Area Index of North Central Wisconsin Forests Using the Landsat Thematic Mapper, *Remote Sens. Environ.*, 61(2): 229-245.

Fournier R.A., J.E. Luther, L. Guindon, M.-C. Lambert, D. Piercey, R.J. Hall and M.A. Wulder, 2003, Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: test cases in Newfoundland and Quebec, *Can. J. For. Res.* 33(10): 1846-1863.

Fraser. R.S., O.P. Baheti and A.H. Al-Abbas, 1977, The effects of the atmosphere on the classification of satellite observations to identify surface features, *Remote Sens. Environ.*, 6 : 229-249.

Gao B.C., Y.J. Kaufman, D. Tanré and R.R. Li, 2002, Distinguishing tropospheric aerosols from thin cirrus clouds for improved aerosol retrievals using the ratio of 1.38- $\mu\text{m}$  and 1.24- $\mu\text{m}$  channels, *Geoph. Res. Lett.*, 29(18): 1890, doi:10.1029/2002GL015475.

Gilbert M.A., C. Conese and F. Maselli, 1994, An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images, *Int. J. Remote Sens.* 15(10): 2065-2086.

Gong P., R. Pu, G.S. Biging and M.R. Larrieu, 2003, Estimation of Forest Leaf Area Index Using Vegetation Indices Derived From Hyperion Hyperspectral Data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41(6): 1355-1362.

Gu D. and A. Gillespie, 1998, Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun-Canopy-Sensor Geometry, *Remote Sens. Environ.*, 64(2): 166-175.

Guissard V., C. Lucau-Danila and P. Defourny, 2005, Crop specific LAI retrieval using optical and radar satellite data for regional crop growth monitoring and modelling, *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology*, proceedings of the SPIE, Vol. 5976, pp. 198-209.

Guyot G. and X.F. Gu, 1994, Effect of Radiometric Corrections on NDVI-Determined from SPOT-HRV and Landsat-TM Data, *Remote Sens. Environ.*, 49(3): 169-180.

Haan J.F., J.W. Hovenier, J.M.M. Kokke and T.C.H. van Stokkom, 1991, Removal of atmospheric influences on satellite-borne imagery: a radiative transfer approach, *Remote Sens. Environ.* 37(1): 1-21.

Haboudane D., J.R. Miller, E. Pattey, P.J. Zarco-Tejada and I.B. Strachan, 2004, Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture, *Remote Sens. Environ.*, 90(3): 337-352.

- Hadjimitsis D.G., C.R.I. Clayton and V.S. Hope, 2004, An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs, *Int. J. Remote Sens.*, 25(18): 3651-3674.
- Hagolle O., G. Dedieu, B. Mougenot, V. Debaecker, B. Duchemin and A. Meygret, 2008, Correction of aerosol effects on multi-temporal images acquired with constant viewing angles: Application to Formosat-2 images, *Remote Sens. Environ.*, 112(4): 1689-1701.
- Hall, F.G., D.E. Strebel, J.E. Nickeson and S.J. Coetz, 1991, Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multi-date, multi-sensor images. *Remote Sens. Environ.*, 35: 11-27.
- Hashim M., A. Watson and M. Thomas, 2004, An approach for correcting inhomogeneous atmospheric effects in remote sensing images, *Int. J. Remote Sens.*, 25(22): 5131-5141.
- Hay, J.E. and J.A. Davies, 1980, Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Canadian Solar Radiation Data Workshop*, J. E. Hay and T. K. Won, (ed.), Ministry of Supply and Services Canada, pp. 59-65.
- Hess M., P. Koepke and I. Schult, 1998, Optical Properties of Aerosols and Cloud: The Software Package OPAC, *B. Am. Meteor. Soc.*, 79(5): 831-844.
- Hill J. and D. Aifadopoulou, 1990, Comparative analysis of Landsat-5 TM and SPOT HRV-1 data for multiple sensor approaches, *Remote Sens. Environ.*, 34(1): 55-70.
- Hill J.H. and B. Sturm, 1991, Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring, *Int. J. Remote Sens.* 12(7): 1471-1491.
- Holben B.N. and C.O. Justice, 1980, The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 46(9): 1191-1200.
- Holben B.N., E. Vermote, Y.J. Kaufman, D. Tanré and V. Kalb, 1992, Aerosol Retrieval over Land from AVHRR Data-Application for Atmospheric Correction, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30(2): 212-222.
- Holben B.N., T.F. Eck and I. Slutsker, 1998, AERONET- A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ.*, 66(1): 1-16.

- Hsu N.C., S.C. Tsay, M.D. King and R. Herman, 2004, Aerosol properties over bright-reflecting source regions, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42(3): 557-569.
- Hu B., W. Lucht and A.H. Strahler, 1999, The Interrelationship of Atmospheric Correction of Reflectance and Surface BRDF Retrieval: A Sensitivity Study, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37(2): 724-738.
- Ignatov A. and L. Stowe, 2002-a, Aerosol retrievals from individual AVHRR channels. Part I: Retrieval algorithm and transition from Dave to 6S Radiative Transfer Model, *J. Atmos. Sci.*, 59(3): 313–334.
- Ignatov A. and L. Stowe, 2002-b, Aerosol retrievals from individual AVHRR channels. Part II: quality control, probability distribution functions, information contents and consistency checks of retrievals, *J. Atmos. Sci.*, 59(3): 335–362.
- Iqbal, 1984, Introduction to solar radiation, Academic Press Inc., U.S.
- Irish R., 2000, Landsat-7 Automatic Cloud Cover Assessment. In: algorithms for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral Imagery IV, Sylvia S. Shen, Michael R. Descour, Editors, *Proceedings of SPIE*, 4049: 348-355.
- Jensen J.R., 2000, Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, Prentice Hall edition, Jan. 2000.
- Jones D. and E.M. Barnes, 2000, Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management, *Agric. Sys.*, 65: 137-158.
- Justice C.O. and B. Holben, 1979, Examination of Lambertian and non-Lambertian models for simulating the topographic effect on remotely sensed data, National Aeronautics and Space Administration, Technical Memorandum 80557, Greenbelt, Maryland.
- Kalluri S., P. Gilruth and R. Bergman, 2003, The potential of remote sensing data for decision makers at the state, local and tribal level: experiences from NASA's Synergy program, *Environ. Sci. Policy*, 6(6): 487-500.
- Karnieli A., Y.J. Kaufman, L. Remer and A. Wald, 2001, AFRI - Aerosol free vegetation index, *Remote Sens. Environ.*, 77: 10-21.

Kaufman Y.J. and R.S. Fraser, 1984, Atmospheric effect on classification of finite fields, *Remote Sens. Environ.*, 15: 95-118.

Kaufman Y.J., 1984, Atmospheric effects on spatial resolution of surface imagery, *Appl. Opt.*, 23(19): 3400-3408.

Kaufman Y.J. and C. Sendra, 1988, Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery, *Int. J. Remote Sens.*, 9(8): 1357-1381.

Kaufman Y.J. and D. Tanré, 1992, Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30(2): 261-270.

Kaufman Y.J. and D. Tanré, 1996, Strategy for Direct and Indirect Methods for Correcting the Aerosol Effect on Remote Sensing: from AVHRR to EOS-MODIS, *Remote Sens. Environ.*, 55: 65-79.

Kaufman Y.J., D. Tanré, L.A. Remer, E.F. Vermote, A. Chu and B.N. Holben, 1997, Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer, *J. Geophys. Res.*, 102(D14): 17,051-17,067.

Kaufman Y.J. and D. Tanré, 1998, Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS Products, Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD-MOD-02, NASA Goddard Space Flight Center, 85 pp.

Kaufman Y.J., D. Tanré and O. Boucher, 2002, A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419: 215-223.

Kaufman Y.J., O. Boucher, D. Tanré, M. Chin, L.A. Remer and T. Takemura, 2005, Aerosol anthropogenic component estimated from satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17804, doi:10.1029/2005GL023125.

Kawata Y., S. Ueno and T. Kusaka, 1988, Radiometric correction for atmospheric and topographic effects on Landsat MSS images, *Int. J. Remote Sens.*, 9(4): 729-748.

Kimes D.S. and J.A. Kirchner, 1981, Modeling the effects of various radiant transfers in mountainous terrain on sensor response, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 19(2): 100-108.

King M.D, Y.J. Kaufman, D. Tanré and T. Nakajima, 1999, Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present and future, *B. Am. Meteor. Soc.*, 80: 2229-2259.

Kneizys F.X., E.P. Shettle, L.W. Abreu, J.H. Chetwynd, G.P. Anderson, W.O. Gallery, J.E.A. Selby and S.A. Clough, 1988, User Guide to LOWTRAN 7, AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophysics Lab., Bedford, MA.

Kuusk A., 1998, Monitoring of vegetation parameters on large areas by the inversion of a canopy reflectance model, *Int. J. Remote Sens.*, 19(15): 2893-2905.

Lafortune E. and Y. Willems, 1994, Using the modified Phong reflectance model for physically based rendering. Technical Report CW197, Dept. Comp. Sci., K.U. Leuven, 1994.

Lavoie A., F. Cavayas and J.M. Dubois, 2001, Algorithme de simulation du signal des masses d'eau côtières au niveau des capteurs satellite à haute résolution spatiale fondé sur le code atmosphérique 6S, *Int. J. Remote Sens.*, 22(9): 1683-1708.

Lee K.S., W.B. Cohen, R.E. Kennedy, T.K. Maieringer and S.T. Gower, 2004, Hyperspectral versus multispectral data for estimations leaf area index in four different biomes, *Remote Sens. Environ.*, 91(3-4): 508-520.

Liang S., H. Fang and M. Chen, 2001, Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery - Part I: Methods, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(11): 2490-2498.

Liang S., H. Fang, M. Kaul, T.G. Van Niel, R. McVicar, J.S. Pearlman, C.L. Walthall, C.S.T. Daughtry and K.F. Huemmrich, 2003, Estimation and validation of Land surface Broadband Albedos and Leaf Area Index from EO-1 Ali Data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(6): 1260-1267.

Liang S., 2004, Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces, Wiley Series in Remote Sensing, Published by John Wiley Kr Sons, Inc. Hoboken. New Jersey. Published simultaneously in Canada.

Liu B.Y.H and R.C.Jordan, 1963, The long term average performance of flat-plate solar energy collectors, *Solar Energy*, 7(2): 53-74.

- Liu C.H., A.J. Chen and G.R. Liu, 1996, An image based retrieval algorithm of aerosol characteristics and surface reflectance for satellite images, *Int. J. Remote Sens.*, 17(17): 3477 - 3500.
- Liu C.H. and E.F. Vermote, 2000, A reflectance retrieval algorithm for Landsat TM satellite image, *The 21<sup>st</sup> Asian Conference on Remote Sensing*, December 4-8, Taipei, Taiwan, pp. 522-526.
- Lobell D.B., G.P. Asner, J.I. Ortiz-Monasterio and T.L. Benning, 2003, Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties, *Agricultural Ecosystems & Environment*, 94: 205-220.
- Lobell D.B. and G.P. Asner, 2003, Comparison of Earth Observing-1 ALI and Landsat ETM+ for Crop Identification and Yield Prediction in Mexico, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(6): 1277-1282 .
- Loutzenhiser P.G., H. Manz, C. Felsmann, P.A. Strachan and G.M. Maxwell, 2007, An empirical validation of modeling solar gain through a glazing unit with external and internal shading screens, *Applied Thermal Engineering*, 27: 528-538.
- Maas, S.J., 1988, Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models, *Ecological Modelling*, 41: 247-268.
- Martonchik J.V. and D.J. Diner, 1985, Three-dimensional radiative transfer using Fourier-transform matrix-operator method, *JQSRT*, 34(2): 133-148.
- Maselli F., 2004, Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data, *Remote Sens. Environ.*, 89: 423-433.
- Matthew M.W., S.M. Adler-Golden, A. Berk, G. Felde, G.P. Anderson, D. Gorodetzky, S. Paswaters and M. Shippert, 2002, Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data, *Proceedings of 31<sup>st</sup> Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, Burlington, MA, USA, 16-17 Oct. 2002, pp. 157-163.
- McDonald A.J., F.M. Gemmell and P.E. Lewis, 1998, Investigation of the Utility of Spectral Vegetation Indices for Determining Information on Coniferous Forests, *Remote Sens. Environ.*, 66: 250-272.

- Mefti A., M.Y. Bouroubi and A.Adane, 2003, Generation of hourly solar radiation for inclined surfaces using monthly mean sunshine duration in Algeria, *Energy Conversion and Management*, 44(19): 3125-3141.
- Minnaert N., 1941, The reciprocity principle in lunar photometry, *Astroph. J.*, 93: 403-410.
- Miura T., A.R. Hute H. Yoshioka and B.N. Holben, 2001, An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices from dark target-based atmospheric correction, *Remote Sens. Environ.*, 78: 284-298.
- Moran M.S., R.D. Jackson, G.F. Hart, P.N. Slater, R.J. Bartell, S.F. Biggar, D.I. Gellman and R.P. Santer, 1990, Obtaining Surface Reflectance Factors from Atmospheric and View Angle Corrected SPOT-1 HRV Data, *Remote Sens. Environ.*, 32: 203-214.
- Moran M.S., R.D. Jackson, P.N. Salter and P.M. Teillet, 1992, Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output, *Remote Sens. Environ.*, 41: 169-184.
- Moran M.S., Y. Inoue and E.M. Barnes, 1997, Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management, *Remote Sens. Environ.*, 61: 319-346.
- Moran M.S., R. Bryant, C.D. Holifield and S. McElroy, 2003, A refined empirical line approach for retrieving surface reflectance from EO-1 ALI images, *Remote Sens. Environ.*, 78: 71-82.
- Muller E., 1993, Evaluation and Correction of Angular Anisotropic Effects in Multidate SPOT and TM Data, *Remote Sens. Environ.*, 45: 295-309.
- Murakami T., 2002, Minnaert constant of several forest types from SPOT/HRV data, *J. Japan Soc. Photogramm. Remote Sens.*, 41(1): 47-55
- Myneni R.B. and G. Asrar, 1994, Atmospheric effects and spectral vegetation indices, *Remote Sens. Environ.*, 47: 390-402.
- Myneni R.B., B. Pinty, D.S. Maggion, S. Kimes, J. Jaquinta, J.L. Privette, N. Gobron, M. Verstraete and D.L. Williams, 1995, Optical Remote Sensing of Vegetation: Modeling, Caveats, and Algorithms, *Remote Sens. Environ.*, 51: 169-188.

Nelson T., H.G. Wilson, B. Boots and M.A. Wulder, 2005, Use of ordinal conversion for radiometric normalization and change detection, *Int. J. Remote Sens.*, 26(3): 535-541.

O'Neill N.T., A. Royer and M.N. Nguyen, 1996, Scientific and Technical Report on the Development of a Modified Version of the M5S Code which Incorporates Major Features of the 6S Code, Internal Report CARTEL-1996-020, CARTEL, Département de géographie et télédétection, 2500, boul. de l'Université, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1, 62 p.

O'Neill N.T., T.F. Eck, B.N. Holben, A. Smirnov, A Royer and Z. Li, 2002, Optical properties of boreal forest fire smoke derived from Sun photometry, *J. Geoph. Res.*, 107(D11): 4125, doi:10.1029/2001JD000877.

Ouaidrari H. and E.F. Vermote, 1999, Operational Atmospheric Correction of Landsat TM Data, *Remote Sens. Environ.*, 70: 4-15.

Pax-Lenney M., E.C. Woodcock, S.A. Macomber, S. Gopal and C. Song, 2001, Forest mapping with a generalized classifier and Landsat TM data, *Remote Sens. Environ.*, 77: 241-250.

Petty G.W., 2006, *A First Course In Atmospheric Radiation*, Sundog Publishing, ISBN-10: 0-9729033-1-3.

Phong B.T., 1975, Illumination for computer generated pictures, *Comm. ACM*, 18(6) 311-317.

Pons X. and L. Solé-Sugrañes, 1994, A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data, *Remote Sens. Environ.*, 48: 191-204.

Powell R.L., N. Matzkea, C. De Souza, M. Clarka, I. Numataa, L.L. Hessc and D.A. Robertsa, 2004, Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon, *Remote Sens. Environ.*, 90: 221-234.

Proy C., D. Tanré and P.Y. Deschamps, 1989, Evaluation of topographic effects in remotely sensed data, *Remote Sens. Environ.*, 30: 21-32.

- Pu R. and P. Gong, 2004, Wavelet transform applied to EO-1 hyperspectral data for forest LAI and crown closure mapping, *Remote Sens. Environ.*, 91: 212-224.
- Pu R., Q. Yu, P. Gong and G.S. Biging, 2005, EO-1 Hyperion, ALI and Landsat 7 ETM+ data comparison for estimating forest crown closure and leaf area index, *Int. J. Remote Sens.*, 26(3): 457-474.
- Putsay M., 1992, A simple atmospheric method for the short wave satellite images, *Int. J. Remote Sens.*, 13(8): 1549-1558.
- Qiu J., 2003, Broadband Extinction Method to Determine Aerosol Optical Depth from Accumulated Direct Solar Radiation, *J. Appl. Meteor.*, 42: 1611-1625.
- Rahman H., and Dedieu, G., 1994, SMAC: a simplified method for atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *Int. J. Remote Sens.*, 15: 123-143.
- Rahman M.M., E. Csaplovics and B. Koch, 2005, An efficient regression strategy for extracting forest biomass information from satellite sensor data, *Int. J. Remote Sens.*, 26(7): 1511-1519.
- Remer L.A., Y.J. Kaufman, D. Tanré, S. Mattoo, D.A. Chu, J.V. Martins, R.R. Li, C. Ichoku, R.C. Levy, R.G. Kleidman, T.F. Eck, E. Vermote and B.N. Holben, 2005, The MODIS aerosol algorithm, products, and validation, *J. Atmos. Sci.*, 62: 947-973.
- Riaño D., E. Chuvieco, J. Salas and I. Aguado, 2003, Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 41(5): 1056-1061 .
- Richardson A.J., 1982, Relating Landsat digital count values to ground reflectance for optically thin atmospheric conditions, *Appl. Opt.*, 21(8): 1457-1464.
- Richter R., 1991, Error bounds of a fast atmospheric correction algorithm for the Landsat thematic mapper and multispectral scanner bands, *Appl. Opt.*, 30: 4412-4417.
- Richter R., 1996-a, A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm, *Int. J. Remote Sens.*, 17(6): 1201-1214.

Richter R., 1996-b, Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a clear/haze transition region, *Comput. Geosci.* 22: 675-681.

Richter 1997, Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery, *Int. J. Remote Sens.*, 18(5): 1099-1111.

Richter R., 2004, ATCOR: Atmospheric and Topographic Correction, German Aerospace Center, Mars 2004.

Royer A., L. Charbonneau and P.M. Teillet, 1988-a, Interannual Landsat-MSS Reflectance Variation in an Urbanized Temperate Zone, *Remote Sens. Environ.*, 24: 423-446.

Royer A., A. Davis and N. O'Neill, 1988-b, Analyse des effets atmosphériques dans les images HRV de SPOT, *Journal Canadien de Télédétection*, 14(2): 80-91.

Sandmeier S. and I. Klaus, 1997, A Physically-Based Model to Correct Atmospheric and Illumination Effects in Optical Satellite Data of Rugged Terrain, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35(3): 708-717.

Santer R., X.F. Gu, G. Guyot, J.L. Deuzé, C. Devaux, E. Vermote and M. Verbrugge, 1992, SPOT Calibration at the La Crau Test Site (France), *Remote Sens. Environ.*, 41: 227-237.

Schmechting C., V. Carrere, P. Dubuisson, J.C. Roger and R. Santer, 2003, Sensitivity analysis for the aerosol retrieval over land for MERIS, *Int. J. Remote Sens.*, 24: 2921-2944.

Shepherd J.D. and J.R. Dymond, 2003, Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography, *Int. J. Remote Sens.*, 24(17): 3503-3514.

Shettle E.P. and R.W. Fenn, 1979: Models of the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on their Optical Properties. Project 7670, Air Force Geoph. Lab., Massachusetts.

Shin D., 2000, Sensitivity of NDVI to Atmospheric effects,  
<http://www.unc.edu/~sdhyok/experience.html> (Datum: 12.07.2001).

Sjoberg R.W. and B.K.P. Horn, 1983, Atmospheric effects in satellite imaging of mountainous terrain, *Appl. Opt.*, 22: 1702-1716.

Smith J.A., T. Lin, and K.J. Ranson, 1980, The lambertian assumption and Landsat data, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 46: 1183-1189.

Smith A.M., G. Bourgeois, P.M. Teillet, J. Freemantle and C. Nadeau, 2008, A comparison of NDVI and MTVI2 for estimating LAI using CHRIS imagery: a case study in wheat, *Can. J. Remote Sens.*, 34(6): 539-548.

So C.K., C.M. Cheng and K.C. Tsui, 2005, Weather and Environmental Monitoring Using MODIS AOD Data in Hong Kong, China, *The First International Symposium on Cloud-prone & Rainy Areas Remote Sensing*, Chinese University of Hong Kong, 6-8 October 2005.

Soenen S.A., D.R. Peddle and C.A. Coburn, 2005, SCS+C: A Modified Sun-Canopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43(9): 2148-2159.

Song C., E.C. Woodcock, K.C. Seto, M.P. Lenney and A.M. Scott, 2001, Classification and Change Detection Using Landsat TM Data : When and How to Correct Atmospheric Effects?, *Remote Sens. Environ.*, 75: 230–244.

Soudani K., C. François, G. Le Maire, V. Le Dantec and E. Dufrêne, 2006, Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands, *Remote Sens. Environ.*, 102: 161-175.

Soufflet V., D. Tanré, A. Royer and N.T. O'Neill, 1997, Remote sensing of aerosols over boreal forest and lake water from AVHRR data, *Remote Sens. Environ.*, 60: 22-34.

Su W., 2000, A new  $\epsilon$  Function for Atmospheric Correction Algorithm, *Geoph. Res. Lett.*, 27(22): 3707-3710.

Tanré D., M. Herman P.Y. Deschamps and A de Leffe, 1979, Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties, *Appl. Opt.*, 18(21): 3587-3594.

Tanré D., M. Herman and P.Y. Deschamps, 1981, Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance, *Appl. Opt.*, 20(20): 3676-3684.

Tanré D., B.N. Holben and Y.J. Kaufman, 1992, Atmospheric Correction Algorithm for NOAA-AVHRR Product : Theory and Application, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30(2): 231-248.

Teillet P.M., B. Guindon and D.G. Goodenough, 1982, On the slope-aspect correction of multispectral scanner data, Canad. J. Remote Sens., 8(2): 84-106.

Teillet P.M., N.T. O'Neill, A. Kalinauskas, D. Sturgeon and G. Fedosejevs, 1987, A Dynamic Regression Algorithm for Incorporating Atmospheric Models Into Image Correction Procedures, Proceedings of the 1987 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'87), Ann Arbor, Michigan, pp. 913-918.

Teillet P.M., Rayleigh Optical Depth Comparisons from Various Sources, 1990, Appl. Opt., 29: 1897-1900.

Teillet P.M. and R.P. Santer, 1991, Terrain Elevation and Sensor Altitude Dependence in a Semi-Analytical Atmospheric Code, Canad. J. Remote Sens., 17(1): 36-44.

Teillet P.M., 1992, An algorithm for the radiometric and atmospheric correction of AVHRR data in the solar reflective channels, Remote Sens. Environ., 41: 185-195.

Teillet P.M. and G. Fedosejevs, 1995, On the Dark Target Approach to Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data, Canad. J. Remote Sens., 21(4): 375-381.

Teillet P.M., K. Staenz and D.J. Williams, 1996, Effects of Spectral, Spatial, and Radiometric Characteristics on Remote Sensing Vegetation Indices for Forested Regions, Remote Sens. Environ., 61: 139-149.

Teillet P.M., 1997, A status overview of earth observation calibration/validation for terrestrial applications, Canad. J. Remote Sens., 23(4): 291-298.

Teillet P.M., D.N.H. Horler and N.T. O'Neill, 1997-a, Calibration, validation, and quality assurance in remote sensing: a new paradigm, Canad. J. Remote Sens., 23(4): 401-414.

Teillet P.M., K. Staenx and D.J. Williams, 1997-b, Effects of Spectral, Spatial, and Radiometric Characteristics on Remote Sensing Vegetation Indices of Forested Regions, Remote Sens. Environ., 61: 139-149.

Teillet P.M., G. Fedosejevs, R.K. Hawkins, T.I. Lukowski, R.A. Neville, K. Staenz, R. Touzi, J. van der Sanden and J. Wolfe, 2004, Importance of Data Standardization for Generating High Quality Earth Observation Products for Natural Resource Management, Canada Centre for Remote Sensing, Earth Sciences Sector, Natural Resources Canada, October 2004.

Teillet P.M., G. Fedosejevs, K.J. Thome and J.L. Barker, 2007, Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain, *Remote Sens. Environ.*, 110(3): 393-409.

Teillet P.M. and X. Ren, 2008, Spectral band difference effects on vegetation indices derived from multiple satellite sensor data, *Canad. J. Remote Sens.*, 34(3): 159-173.

Temps, R.C. and K.L. Coulson, 1977, Solar radiation incident upon slopes of different orientations, *Solar Energy*, 19(2): 331-333.

Thome K.J., F.P. Palluconi, T. Takashima and K. Masuda, 1998, Atmospheric correction of ASTER, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36: 1199-1211.

Tokola T., S. Lofman and A. Erkkila, 1999, Relative Calibration of Multitemporal Landsat Data for Forest Cover Change Detection, *Remote Sens. Environ.*, 68: 1-11.

Tremblay N., P. Vigneault et M.Y. Bouroubi, 2005, L'observation des légumes de transformation au Québec au moyen du capteur ETM+ de Landsat 7, Poster présenté au 13<sup>ème</sup> congrès de l'AQT, Chicoutimi, mai 2005.

Tripathi S.N., S. Dey, A. Chandel, S. Srivastva, R.P. Singh and B. Holben, 2005, Comparison of MODIS and AERONET derived aerosol optical depth over the Ganga basin, India, *Annales Geophysicae*, 23: 1093-1101.

Turner R.E. and M.M. Spencer, 1972, Atmospheric model for correction of spacecraft data, *Proceeding of the Eighth International Symposium on Remote Sensing*, Environmental Institute of Michigan, pp. 895-934.

Turner, R.E., Malila, W.A., Nalepka, R.F. and Thomson, F. J., 1974, Influence of the atmosphere on remotely sensed data. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 51: 101-114.

Turner R.E., 1975, Signature Variations due to Atmospheric Effects, International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10<sup>th</sup>, Ann Arbor, Mich., United States, 6-10 Oct. 1975, pp. 671-682.

Turner R.E., W.A. Malila, R.F. Nelepka and F.J. Thomson, 1979, Influence of the atmosphere on remotely sensed data, Report no 48107, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

Turner D.P., W.B. Cohen, R.E. Kennedy, K.S. Fassnacht and J.M. Briggs, 1999, Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across Three Temperate Zone Sites, *Remote Sens. Environ.*, 70: 52-68.

Vermeulen A. C. Devaux and M. Herman, 2000, Retrieval of the scattering and microphysical properties of aerosols from ground-based optical measurements including polarisation. I - Method, *Appl. Opt.*, 39: 6207-6220.

Vermote, E.F., D. Tanré, J.L Deuzé, M. Herman and J.J. Morcrette, 1994, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: User manual, University of Maryland/Laboratoire d'optique atmosphérique, 1994.

Vermote E., and J.C. Roger, 1996, Radiative Transfer Modelling for Calibration and Atmospheric Correction, *Adv. in the use of NOAA AVHRR Data for Land Appl.* 49-72.

Vermote E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman and J.J. Morcrette, 1997-a, Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S : an Overview, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35(3): 675-686.

Vermote E.F., N. El Saleous, C.O. Justice, Y.J. Kaufman, J.L. Privette, L. Remer, J.C. Roger, and D. Tanré, 1997-b, Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces : Background, operational algorithm and validation, *J. Geoph. Res.* 102(D14): 17,131-17,141.

Vermote E.F., D. Tanré, J.L Deuzé, M. Herman and J.J. Morcrette, 1997-c, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: 6S user guide version 2. University of Maryland/Laboratoire d'optique atmosphérique CNRS.

Vermote E.F., N. El Saleous and C.O. Justice, 2002, Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared : first results, *Remote Sens. Environ.*, 83: 97-111.

Viña A., A.A. Gitelson, D.C. Rundquist, G. Keydan, B. Leavitt and J. Scepers, 2004, Monitoring Maize (*Zea mays* L.) with Remote Sensing, *Agron. J.*, 96: 1139-1147.

Walthall C., W. Dulaney, M. Anderson, J. Norman, H. Fang and S. Liang, 2004, A comparison of empirical and neural network approaches for estimating corn and soybean leaf area index from Landsat ETM+ imagery, *Remote Sens. Environ.*, 92: 465-474.

Wharton S.W., 1987, A spectral-knowledge-based approach for urban land-cover discrimination, *IEEE trans. Geosci. Remote Sens.* 25: 272-282.

Williams A.E.P. and E.R. Hunt, 2004, Accuracy assessment for detection of leafy spurge with hyperspectral imagery, *J. Range Manage.*, 57: 106-112.

Wilson E.H. and S.A. Sader, 2002, Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sens. Environ.*, 80: 385-396.

Woodcock C.E., S.A. Macomber, M. Pax-Lenney and W.B. Cohen, 2001, Monitoring large areas for forest change using Landsat: Generalization across space, time and Landsat sensors, *Remote Sens. Environ.*, 78: 194-203.

Xiao X., S. Boles, J. Liu, D. Zhuang and M. Liu, 2002, Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data, *Remote Sens. Environ.*, 82: 335-348.

Yu H., Y.J. Kaufman, M. Chin, G. Feingold, L.A. Remer, T.L. Anderson, Y. Balkanski, N. Bellouin, O. Boucher, S. Christopher, P. DeCola, R. Kahn, D. Koch, N. Loeb, M.S. Reddy, M. Schulz, T. Takemura and M. Zhou, 2006, A Review of Measurement-based Assessment of Aerosol Direct Radiative Effect and Forcing, *Atmos. Chemis. Phys.*, 6: 613-666.

Zagolsky F. and J.P. Gastellu-Etchegorry, 1995, Atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S model, *Int. J. Remote Sens.*, 16(16): 3115-3146.

Zarco-Tejada P.J., S. L. Ustin and M.L. Whiting, 2005, Temporal and Spatial Relationships between Within-Field Yield Variability in Cotton and High-Spatial Hyperspectral Remote Sensing Imagery, *Agron. J.*, 97: 641-653.

Zhao W., M. Tamura and H. Takahashi, 2000, Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data using 6S code, *Remote Sens. Environ.*, 76: 202-212.

Zhang X., M.A. Friedel, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges F.G. Bradley, B.C Reed and A. Huete, 2003, Monitoring vegetation phenology using MODIS, *Remote Sens. Environ.*, 84: 471-475.

Zhang Y. and B. Guindon, 2003, Quantitative Assessment of a Haze Suppression Methodology for Satellite Imagery: Effect on Land Cover Classification Performance, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 41(5): 1082-1089.

Zheng D., J. Rademacher, J. Chen T. Crow, Mary Bresee, J. Le Moine and S.-R. Ryu, 2004, Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA, *Remote Sens. Environ.*, 93(3): 402-411.

## ANNEXE 1 - Absorption du rayonnement solaire par les gaz atmosphériques

### A1-1. Notion d'épaisseur optique d'absorption

L'absorption est le phénomène d'atténuation du rayonnement (solaire) lors de sa traversée d'un milieu de propagation (une épaisseur d'atmosphère par exemple). L'absorption se manifeste par la disparition d'un certain nombre de photons dans la direction de propagation. Les photons perdus sont convertis en une autre forme d'énergie (photochimique, thermique, fluorescence, ...).

Soit un rayonnement incident de radiance (flux)  $L$ . Si on note  $dL$  la radiance perdue (par absorption) dans l'élément de milieu de propagation d'épaisseur  $dx$  (figure A1.a), le coefficient d'absorption (de volume)  $\sigma_a$  est défini tel que :

$$dL = -\sigma_a L dx \quad (\text{A1.a})$$

Si  $x$  est exprimé en m, l'unité de  $\sigma_a$  est le  $\text{m}^{-1}$ .

L'intégration entre les limites  $x_1$  et  $x_2$  donne :  $\int_{L_2}^{L_1} \frac{dL}{L} = \int_{x_1}^{x_2} -\sigma_a dx$  d'où :  $\text{Log}\left(\frac{L(x_2)}{L(x_1)}\right) = \int_{x_2}^{x_1} -\sigma_a dx$

$$\text{et ainsi :} \quad L(x_2) = L(x_1) \exp(-\tau_a) \quad (\text{A1.b})$$

$$\text{avec :} \quad \tau_a = \int_{x_2}^{x_1} \sigma_a dx$$

$\tau_a$  est l'épaisseur optique d'absorption entre  $x_1$  et  $x_2$ , c'est un coefficient sans unité. L'équation A1.b est la loi d'extinction exponentielle de Beer.

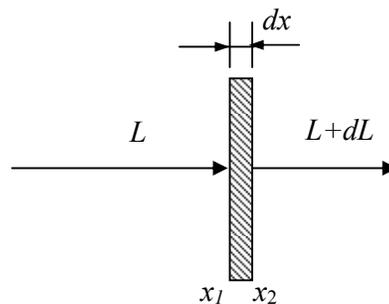


Figure A1.a. Absorption de radiance  $L$  par un milieu d'épaisseur  $dx$

La transmittance du milieu entre  $x_1$  et  $x_2$  le long de la direction de propagation est liée à l'épaisseur optique d'absorption par :  $T = \frac{L(x_2)}{L(x_1)} = \exp(-\tau_a)$ . L'absorbance est l'énergie absorbée, non transmise :  $A = 1 - T$ .

Le coefficient d'absorption moléculaire est défini par rapport au coefficient d'absorption par :

$$\sigma_a^{mol} = \frac{\sigma_a}{N} \text{ en m}^2 \text{ (m}^{-1}/\text{m}^{-3}\text{)}.$$

Si  $\sigma_a$  est connu à une pression  $P$  et une température  $T_a$ ,  $\sigma_a^*$  à la température  $T_a^*$  et la pression

$$P^* \text{ est : } \sigma_a^* = \sigma_a \frac{P^* T_a}{P T_a^*}.$$

## A1-2. Les gaz atmosphériques

Les gaz qui constituent l'atmosphère terrestre sont donnés sur le tableau A1.a. Ces gaz se distribuent de manière homogène et connue dans l'atmosphère, à l'exception de la vapeur d'eau et de l'ozone. Les gaz atmosphériques absorbent considérablement le rayonnement solaire dans certaines longueurs d'onde (raies d'absorption).

Tableau A1.a. Gaz présents en quantités stables et variables dans l'atmosphère terrestre.

Constituants stables		Constituants variables	
Constituent	% par volume	Constituent	% par volume
Azote (N <sub>2</sub> )	78.084	<i>Vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O)</i>	<i>0-2</i>
Oxygène (O <sub>2</sub> )	20.948	<i>Ozone (O<sub>3</sub>)</i>	<i>0-12 10<sup>-4</sup></i>
Argon (Ar)	0.934	Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	0.001 10 <sup>-4</sup>
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0.036	Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	0.001 10 <sup>-4</sup>
Néon (Ne)	18.18 10 <sup>-4</sup>	Ammoniaque (NH <sub>3</sub> )	0.004 10 <sup>-4</sup>
Hélium (He)	5.24 10 <sup>-4</sup>	Oxyde d'azote (NO)	0.0005 10 <sup>-4</sup>
Krypton (Kr)	1.14 10 <sup>-4</sup>	Sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S)	0.00005 10 <sup>-4</sup>
Xénon (Xe)	0.089 10 <sup>-4</sup>	Vapeur d'acide nitrique (HNO <sub>3</sub> )	Traces
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	0.5 10 <sup>-4</sup>	Chlorofluorocarbones (CF <sub>i</sub> Cl <sub>j</sub> )	~10 <sup>-10</sup>
Méthane (CH <sub>4</sub> )	1.7 10 <sup>-4</sup>		
Oxyde nitriques (N <sub>2</sub> O)	0.3 10 <sup>-4</sup>		
Monoxyde de carbone (CO)	0.08 10 <sup>-4</sup>		

### A1-3. Origine des bandes d'absorption des gaz atmosphériques

Les phénomènes d'absorption ont lieu lorsque les photons entrent en collision avec les molécules des gaz atmosphériques sous certaines conditions. D'abord, il faut savoir que les niveaux d'énergie de ces molécules ne peuvent prendre que des valeurs discrètes déterminées par la structure de la molécule et décrits par les lois de la mécanique quantique. L'absorption (ou l'émission) de photon se fait lorsque l'énergie du photon  $E=h\nu$  correspond à l'énergie  $\Delta E$  nécessaire pour que la molécule passe d'un niveau d'énergie  $E_1$  à un autre niveau  $E_2$  parmi les niveaux d'énergie que peut prendre la molécule.

Il y a quatre façons (figure A1.b) par lesquelles l'énergie d'une molécule peut varier (augmenter ou diminuer) :

- variation de l'énergie cinétique de translation ( $\Delta E_{\text{trans}}$ ), i.e. la température,
- variation de l'énergie cinétique de rotation ( $\Delta E_{\text{rot}}$ ) lors de la transition d'un état rotationnel à un autre,
- variation de l'énergie de vibration ( $\Delta E_{\text{vib}}$ ) des liaisons des molécules polyatomiques lors de la transition d'un état vibrationnel à un autre, l'excès de vibration entraîne la dissociation de la molécule,
- variation électronique ( $\Delta E_{\text{elec}}$ ) due la redistribution des charges électriques à l'intérieur de la molécule incluant le changement d'orbite ou d'atome par les électrons et la séparation ou la réunification des atomes liés par des forces électrostatiques (rupture ou construction d'une liaison), l'excès de cette énergie entraîne l'ionisation.

L'énergie totale d'une molécule peut s'écrire :  $E = E_{\text{rot}} + E_{\text{vib}} + E_{\text{elec}} + E_{\text{trans}}$

Les transitions rotationnelles nécessitent une énergie faible pouvant être fournie par des photons de la gamme des micro-ondes. Les niveaux d'énergie vibrationnelle correspondent à des longueurs d'onde du domaine infrarouge. L'énergie nécessaire aux transitions électroniques est de l'ordre de grandeur de celle des photons des gammes du visible et de l'ultraviolet (voir tableau A1.b et figure A1.c).

Table A1.b. Absorption de photon d'énergie  $E=h\nu$  selon l'énergie  $\Delta E$  nécessaire pour que la molécule passe d'un niveau d'énergie  $E_1$  à  $E_2$  parmi les niveaux que peut prendre la molécule.

Transition	$\Delta E$ (eV) = $h\nu$	$\nu$	$\lambda=c/\nu$	Bande spectrale
Électronique	10	$2.4 \times 10^{15}$	83.3 nm	UV et visible
Vibration	0.1	$2.4 \times 10^{13}$	8.33 $\mu\text{m}$	Infrarouge
Rotation	0.001	$2.4 \times 10^{11}$	0.833 mm	Micro-ondes

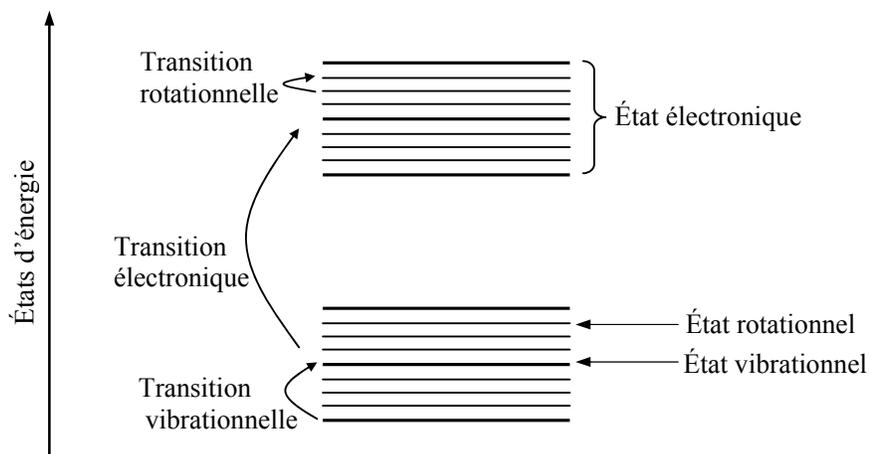


Figure A1.b. Schématisation des quantum d'énergie des transitions rotationnelles, vibrationnelles et électroniques.

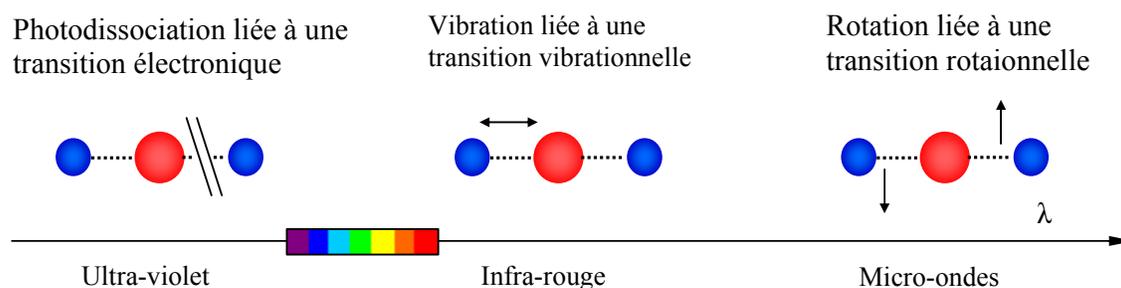


Figure A1.c. Correspondance entre les transitions rotationnelles, vibrationnelles et électroniques et la gamme de longueurs d'onde.

Ces phénomènes de transition rotationnelle, vibrationnelle ou électronique ne se font pas séparément et indépendamment les uns aux autres ; ils ont lieu simultanément entraînant des bandes d'absorption très complexes. Les interactions énergétiques entre les états électroniques, vibrationnels et rotationnels font que l'absorption (ou l'émission) des molécules gazeuses n'est pas strictement monochromatique, mais est normalement distribuée autour d'une valeur centrale  $\nu_0=E/h$  pour laquelle l'absorption est maximale. Les collisions

entre les molécules peuvent également engendrer des distorsions dans les niveaux d'énergie avec des décalages de la fréquence centrale même si l'énergie générée par ces collisions n'est pas suffisante pour créer une transition. Autre source de variation de la fréquence centrale et de la largeur de bande d'absorption : l'effet Doppler dû au déplacement (par excitation thermodynamique) des molécules qui fait que la fréquence des photons perçue au niveau des molécules peut varier. La convolution des effets de collision et Doppler est aussi un facteur de variation de la forme d'absorption.

La ligne d'intensité est définie par :  $S = \int_0^{\infty} \sigma_a(\nu) d\nu$

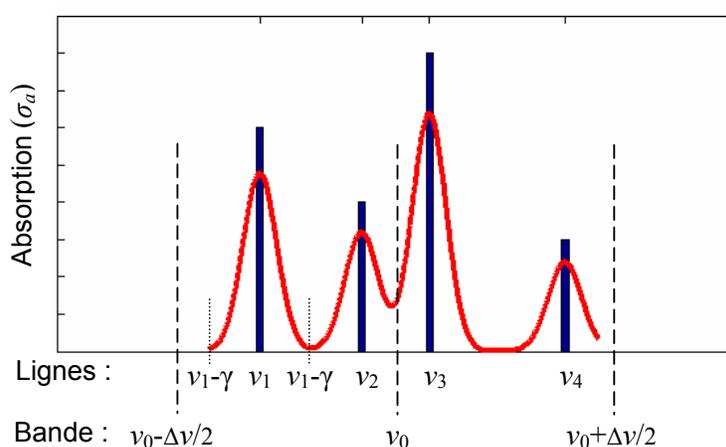


Figure A1.d. Bande d'absorption constituée de plusieurs lignes d'absorption

Ainsi, au lieu de parler de lignes d'absorption, il serait plus réaliste d'aborder le sujet en terme de bandes moyennes d'absorption et des bandes moyennes de transmission correspondantes. Ainsi, pour un profil de coefficient d'absorption  $\sigma_a$  tel qu'illustré sur la figure A1.d, la transmittance moyenne dans un intervalle  $\Delta\nu$  autour de la fréquence  $\nu$  s'écrit :

$$\bar{T}(\nu, \Delta\nu) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu-\Delta\nu/2}^{\nu+\Delta\nu/2} \exp(-a\sigma_a(\nu)) d\nu \quad (\text{A1.c})$$

La modélisation de la transmittance spectrale des molécules de gaz atmosphériques peut se faire de deux manières différentes :

Une modélisation exacte ou ligne par ligne : s'effectue en prenant en compte des informations spectroscopiques exactes sur les positions des lignes d'absorption. Cette approche est

fastidieuse et nécessite beaucoup de temps de calcul sur ordinateur, de plus, sa précision est limitée par celle des données spectroscopiques disponibles.

Une modélisation aléatoire des bandes d'absorption : cette approche s'avère nécessaire pour les molécules complexes (tel que H<sub>2</sub>O), elle est basée sur la modélisation de la probabilité  $P(S)$  de l'existence de  $L$  lignes d'absorptions dans un intervalle  $\Delta\nu$  aux positions  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_L$  ayant des intensités comprises entre  $S_j$  et  $S_j+dS_j$ . Dans cette catégorie, se trouvent les modèles de Goody et Malkmus utilisés dans le code 6S pour le calcul des bandes d'absorption des gaz atmosphériques (Goody pour H<sub>2</sub>O et Malkmus pour O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>).

### Modèle de Goody

Selon ce modèle, la densité de probabilité d'une ligne d'intensité  $S$  est donnée par une fonction exponentielle de la forme :  $P(S) = (1/\bar{S}) \exp(-S/\bar{S})$  avec :  $\bar{S} = \int_0^\infty S P(S) dS$

La transmittance moyenne est donnée par :  $\bar{T} = \exp\left(-\frac{\bar{S}u}{\delta} \left(1 + \frac{\bar{S}u}{\pi\gamma}\right)^{-1/2}\right)$

$\delta$  est la largeur des lignes,  $\bar{\gamma}$  la demi largeur des bandes et  $u$  la longueur de parcours.

### Modèle de Malkmus

Ce modèle découle du fait que le modèle de Goody sous-estime les lignes de faible intensité.

Malkmus propose d'ajouter un facteur  $S^{-1}$ , ce qui donne :  $P(S) = (1/S) \exp(-S/\bar{S})$

La transmittance est alors donnée par :  $\bar{T} = \exp\left(-\frac{2\pi\bar{\gamma}}{\delta} \left[\left(1 + \frac{\bar{S}u}{\pi\bar{\gamma}}\right)^{-1/2} - 1\right]\right)$

Ainsi, les modèles à bandes aléatoires de Goody et de Malkmus expriment la transmittance moyenne  $\bar{\tau}$  dans un intervalle  $\Delta\nu$  en fonction des  $L$  lignes d'absorption contenues dans cet intervalle. Chacun de ces lignes ayant une intensité moyenne  $\bar{S}$  et une demi-largeur moyenne  $\bar{\gamma}$ , les valeurs de  $\bar{S}$  et de  $\bar{\gamma}$  sont déterminés à partir de la connaissance expérimentale des valeurs  $S_i$  et de  $\gamma_i$ .

## Exemple de spectre d'absorption gazeuse

La figure A1.e illustre un spectre typique d'absorption gazeuse. La vapeur d'eau est le gaz qui présente le plus de raies d'absorption dans la gamme des longueurs d'ondes représentée (0.5 à 1  $\mu\text{m}$ ).

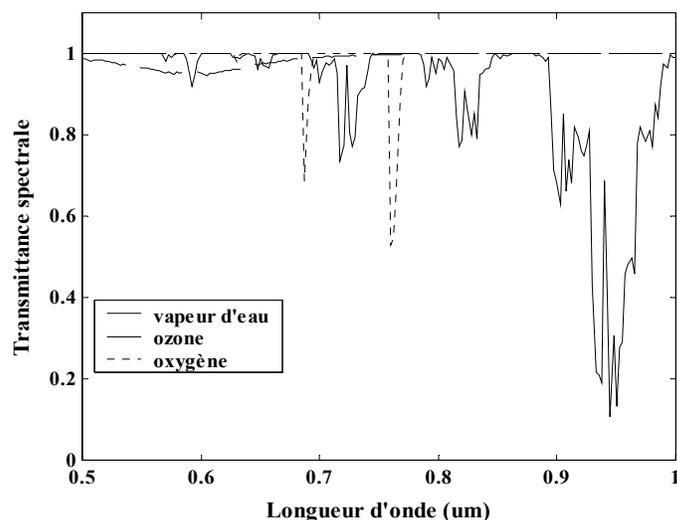


Figure A1.e. Exemple de spectre d'absorption gazeuse

## Références

Liang S., 2004, Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces, Wiley Series in Remote Sensing, Published by John Wiley Kr Sons, Inc. Hoboken. New Jersey. Published simultaneously in Canada.

Lenoble J., 1993, Atmospheric Radiative Transfer, Deepak Publications, ISBN: 0937194212.

Liou K.N, 2002, An Introduction to Atmospheric Radiation, Academic Press, International Geophysics Series Vol. 84, ISBN: 0-12-451451-0.

Petty G.W., 2006, A First Course In Atmospheric Radiation, Sundog Publishing, ISBN-10: 0-9729033-1-3.

## ANNEXE 2 - Diffusion du rayonnement solaire par les gaz et les aérosols

### A2-1. Diffusion simple

La diffusion de la radiance par les inhomogénéités du milieu de propagation (molécules de gaz ou particules d'aérosols) est une redistribution dans l'espace de la radiance (photons) incidente. La diffusion change la direction de propagation du rayonnement mais pas sa nature (longueur d'onde). La radiance est par ce fait atténuée dans la direction de propagation originale et engendrée dans les autres directions.

Pour une radiance (flux) incidente  $L$  se propageant dans la direction de propagation (figure A2.a), si, lors de la traversée d'un élément de volume  $dv$  (de section  $dS$  et d'épaisseur  $dx$ ), l'atténuation de la radiance dans cette direction est de  $dL$ , le **coefficient de diffusion**  $\sigma_d$  ( $m^{-1}$ ) est défini tel que :

$$dL = -\sigma_d L dx \quad (\text{A2.a})$$

Si le volume  $dv$  contient  $N$  molécules gazeuses, on définit le coefficient de diffusion de molécules (ou section efficace de diffusion de molécules) par :  $\sigma_d^{mol} = \frac{\sigma_d}{N}$  en  $m^2$  ( $m^{-1}/m^{-3}$ ).

De même pour le cas de  $N$  particules d'aérosols :  $\sigma_d^{part} = \frac{\sigma_d}{N}$  en  $m^2$  ( $m^{-1}/m^{-3}$ ).

On définit aussi le coefficient de diffusion de masse par :  $\sigma_d^m = \frac{\sigma_d}{\rho}$  (en  $kg^{-1} m^2$ ), avec  $\rho$  densité (en masse) des particules en  $kg/m^3$ .

Par intégration le long du parcours  $x_1 - x_2$  :  $L(x_2) = L(x_1) \exp\left(\int_{x_1}^{x_2} -\sigma_d dx\right) = L(x_1) \exp(-\tau_d)$

Avec :  $\tau_d = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_d dx$  **épaisseur optique de diffusion** (parfois noté  $\delta$  dans la littérature).

Si l'élément de volume  $dv$  est éclairé par une irradiancie  $E$ , le flux diffusé par  $dv$  dans la direction  $\theta$  à l'intérieur d'un angle solide  $d\omega$  s'écrit :  $d^2\phi = L f(\theta) dv d\omega$

$f(\theta)$  est la **fonction de diffusion** en  $m^{-1} sr^{-1}$ , elle caractérise la distribution angulaire des photons diffusés dans les directions exprimées par l'angle  $\theta$ .

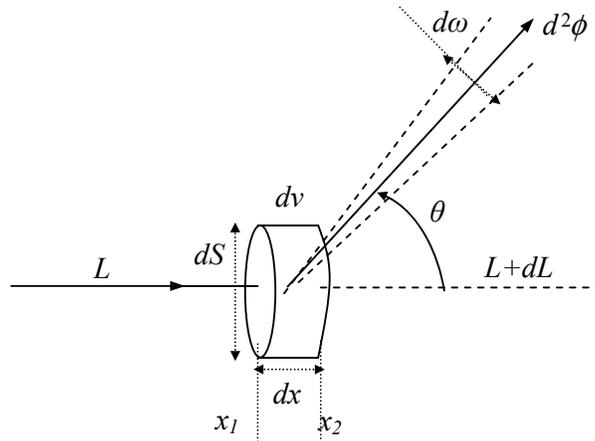


Figure A2-a. Diffusion de la radiance par un élément de volume

Le flux total de diffusion est obtenu en intégrant  $d\omega$  selon toutes les directions :

$$d\phi = L dv \iint_{\text{espace}} f(\theta) d\omega$$

Mais comme :  $\phi = LdS$  et que :  $dv = dS dx$ , alors :  $dLdS = L dSdx \iint_{\text{espace}} f(\theta) d\omega$

Par identification avec l'équation (A2-1), on retrouve la relation entre la fonction de diffusion

et le coefficient de diffusion de volume :  $\sigma_d = \iint_{\text{espace}} f(\theta) d\omega$

Afin de normaliser la fonction de diffusion et la rendre dépendante uniquement des caractéristiques des particules et non de leur nombre ou leur densité, on définit la **fonction de phase** comme suit :

$$p(\theta) = \frac{4\pi}{\sigma_d} f(\theta)$$

Ainsi, l'intégration de la fonction de phase donne  $\iint_{\text{espace}} p(\theta) d\omega = 4\pi$ . La densité des particules

est reflétée par le **coefficient de diffusion de volume**  $\sigma_D$ .

La diffusion d'un milieu est caractérisée complètement par son épaisseur optique de diffusion et sa fonction de phase.

La nature de la diffusion de la radiance (c'est à dire la forme de la fonction de phase) dépend essentiellement de la taille de la particule diffusante par rapport à la longueur d'onde de la radiance incidente. Ainsi, le paramètre de taille est défini comme le rapport entre la

circonférence de la particule et la longueur d'onde de la radianse :  $\chi = \frac{2\pi r}{\lambda}$ , avec :  $r$  rayon de la particule et  $\lambda$  la longueur d'onde.

Selon l'ordre de grandeur du paramètre de taille, la méthode de description de la diffusion va de la théorie basée sur les équations de Maxwell à la simple optique géométrique de Fresnel. Dans la gamme du rayonnement solaire optique (visible et proche infrarouge, entre 0.4 et 2  $\mu\text{m}$ ), la diffusion par les gaz atmosphériques est modélisée par la théorie de Rayleigh alors que la diffusion par les aérosols est décrite par la théorie de Lorenz-Mie (voir table A2.a).

Quelque soit le modèle adopté, il doit permettre de calculer les paramètres qui décrivent complètement la diffusion, à savoir : la **fonction de diffusion** (ou la **fonction de phase**) et le **coefficient de diffusion** (ou un paramètre équivalent).

Table A2.a. Type de diffusion selon la taille des particules par rapport à la longueur d'onde

Nature de la diffusion	Paramètre de taille $\chi$	Particules diffusantes		Approche utilisée pour la description
		Type	Taille	
Diffusion de Rayleigh	$\ll 1$ ( $r \ll \lambda$ )	Gaz	0.1–100 $\eta\text{m}$	Théorie des dipôles
Diffusion de Mie	$\approx 1$ ( $r \approx \lambda$ )	Aérosol	0.1–100 $\mu\text{m}$	Équations de Maxwell
Diffusion non sélective (incohérente ou indépendante)	$\gg 1$ ( $r \gg \lambda$ )	Nuages (cristaux de glace, goutte-lettes d'eau, ...)	0.1–10 mm	Optique géométrique

## A2-2. Diffusion simple par les molécules de gaz atmosphériques - Diffusion de Rayleigh

La théorie de Rayleigh, établie en 1871, décrit la diffusion simple du rayonnement solaire par une particule de taille très inférieure à la longueur d'onde (de la gamme optique), telles que les molécules des gaz atmosphériques. Dans ces conditions, le champ électrique qui excite la particule peut être considéré constant.

Selon la théorie de Rayleigh, le champ électrique  $\xi_0$  de l'onde électromagnétique incidente induit dans la molécule un dipôle électrique de moment  $P$  oscillant à la même fréquence que l'onde incidente (figure A2.b). Ce dipôle émet, selon la théorie électromagnétique, toujours à

la même longueur d'onde. Puisque la taille de la molécule gazeuse est très inférieure à la longueur d'onde, le champ électrique peut être considéré comme constant.

Le moment induit s'écrit :  $P = \alpha \xi_0$

$\alpha$  : coefficient (ou constante) de polarisabilité.

Selon la théorie électromagnétique, l'énergie émise par le dipôle est :  $W = \frac{ck^4}{12\pi\epsilon_0} |P|^2$

$\epsilon_0$  : constante diélectrique du vide (ou du milieu);

$c$  : célérité de la lumière;

$k$  : nombre d'onde ( $2\pi/\lambda$ );

$W$  est l'énergie diffusée par la molécule dans toutes les directions.

Le coefficient de diffusion de la molécule est alors :  $\sigma_d^{mol} = \frac{W}{E_0}$

Puisque l'énergie incidente sur la molécule s'écrit :  $E_0 = \frac{c\epsilon_0}{2} |\xi_0|^2$

Ainsi :  $\sigma_d^{mol} = \frac{k^4 \alpha^2}{6\pi\epsilon_0^2}$

Afin de d'exprimer le champ électrique diffusé  $\xi_d$  en fonction de l'angle de diffusion  $\theta$ , le champ électrique incident  $\xi_0$  est décomposé en une composante perpendiculaire  $\xi_{0i}$  et une composante parallèle  $\xi_{0j}$  par rapport au plan de diffusion. Le champ électrique émis (diffusé) par le dipôle à une distance  $r$  s'écrit :

$$\xi_{di} = \frac{k^2 \alpha \xi_{0i}}{4\pi \epsilon_0 r} \exp(-ikr) \quad ; \quad \xi_{dj} = \frac{k^2 \alpha \xi_{0j}}{4\pi \epsilon_0 r} \cos\theta \exp(-ikr)$$

L'irradiance diffusée à une distance  $r$  est alors :  $E_d = \frac{c\epsilon_0}{2} |\xi_d|^2$

Ainsi :

$$E_{di} = \frac{c\epsilon_0}{2} \frac{k^4 \alpha^2}{16\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{|\xi_0|^2}{r^2} \exp(-2ikr) \quad \text{d'où} \quad E_{di} = \frac{k^4 \alpha^2}{16\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{E_0}{r^2} \exp(-2ikr)$$

$$E_{dj} = \frac{c\epsilon_0}{2} \frac{k^4 \alpha^2}{16\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{|\xi_0|^2}{r^2} \cos^2\theta \exp(-2ikr) \quad \text{d'où} \quad E_{dj} = \frac{k^4 \alpha^2}{16\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{E_0}{r^2} \cos^2\theta \exp(-2ikr)$$

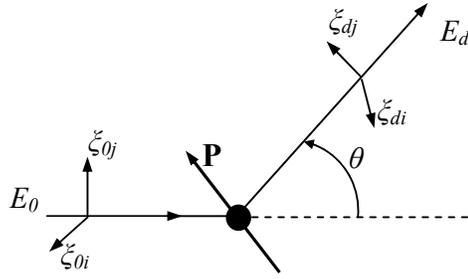


Figure A.2.b. Décomposition du champ électrique de la radiance diffusée

La résultante de  $E_{di}$  et  $E_{dj}$  est alors :  $E_d = \frac{k^4 \alpha^2}{32 \pi^2 \epsilon_0^2} \frac{E_0}{r^2} (1 + \cos^2 \theta) \exp(-2ikr)$

Par identification avec l'équation (no de  $d^2L = L f(\theta) dv d\omega$ ), la fonction de diffusion est :

$$f(\theta) = \frac{k^4 \alpha^2}{32 \pi^2 \epsilon_0^2} (1 + \cos^2 \theta) \quad (\text{A2.b})$$

Et sachant les équations ( $\sigma_D^{mol} = \frac{k^4 \alpha^2}{6 \pi \epsilon_0^2}$ ) et ( $p(\theta) = \frac{4\pi}{\sigma_D} f(\theta)$ ), la fonction de phase est :

$$p(\theta) = \frac{3}{2} (1 + \cos^2 \theta) \quad (\text{A2.c})$$

La fonction de phase exprimée par l'équation (A2.b) est représentée sur la figure A2.c.

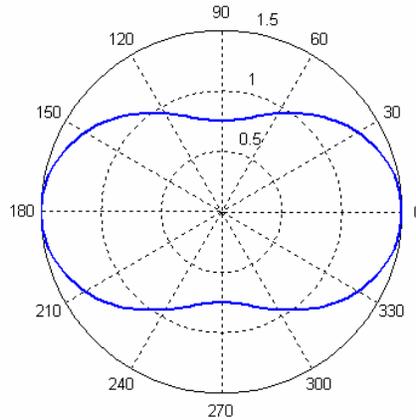


Figure A2.c. Fonction de phase selon la théorie de Rayleigh

Selon l'équation ( $\sigma_d^{mol} = \frac{k^4 \alpha^2}{6 \pi \epsilon_0^2}$ ), la détermination du coefficient de diffusion de la molécule gazeuse  $\sigma_D^{mol}$  passe par la connaissance du coefficient de polarisabilité  $\alpha$  défini dans l'équation ( $P = \alpha \xi_0$ ).

Le coefficient  $\alpha$  est une propriété spécifique à chaque molécule, il traduit son aptitude à acquérir un moment dipolaire permanent sous l'influence d'un champ électrique permanent.

Pour un gaz de densité  $N$  (molécules/unité de volume) et d'indice de réfraction  $n$ , la polarisabilité est donnée par la relation de Lorentz-Lorenz :  $\alpha N = 3\epsilon_0 \frac{n^2-1}{n^2+2}$

Le coefficient de diffusion  $\sigma_d = N \cdot \sigma_d^{mol}$  s'écrit alors :  $\sigma_d = \frac{24\pi^3}{N\lambda^4} \left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right)^2$

Il faut également inclure l'effet de la non isotropie des molécules via un coefficient de dépolarisation  $\delta$ . Le coefficient de diffusion et la fonction de phase sont finalement :

$$\sigma_d = \frac{24\pi^3}{N\lambda^4} \left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right)^2 \frac{6+3\delta}{6-7\delta} \quad (\text{A2.d})$$

$$p(\theta) = \frac{3}{2} \frac{1}{2+\delta} ((1+\delta) + (1-\delta) \cos^2\theta) \quad (\text{A2.e})$$

Le facteur de dépolarisation est lié au coefficient d'asymétrie par la relation :  $\gamma = \frac{\delta}{2-\delta}$

Le coefficient de dépolarisation des molécules d'air sec est de l'ordre de 0.0279. La figure A2-d illustre un exemple de fonction de phase de diffusion Rayleigh correspondant à des coefficients de dépolarisation de  $-0.6$  et de  $0.6$ .

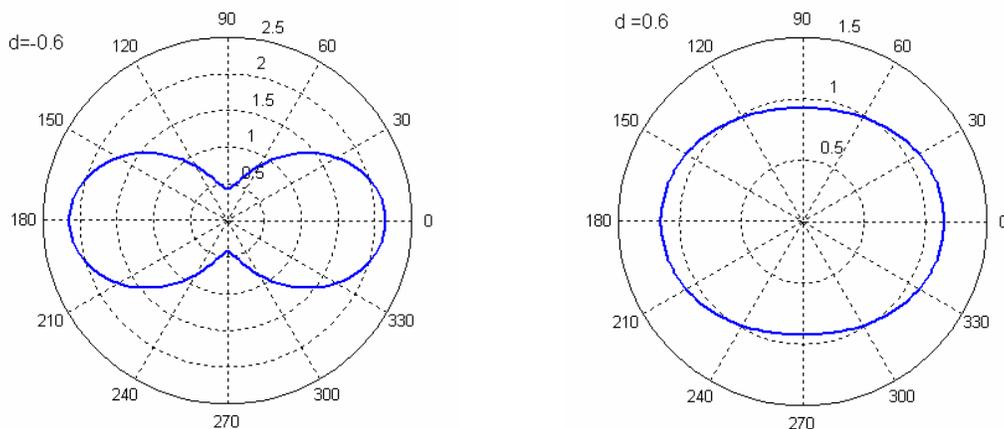


Figure A2.d. Fonctions de phase correspondant à des coefficients de dépolarisation de  $d=-0.6$  et  $d=0.6$

### A2-3. Diffusion simple par les aérosols - Théorie de Lorenz-Mie

La théorie de Mie est basée sur l'application des équations classiques des ondes électromagnétiques (équations de Maxwell) avec des conditions de continuité entre la particule et son environnement. Théoriquement, la théorie de Mie permet de décrire la diffusion des ondes électromagnétiques par des particules de taille et de forme quelconques. Toutefois, en pratique, et pour des raisons de complexité mathématique, seuls les cas de quelques formes simples de particules (sphère, cylindre, ellipsoïde) peuvent être abordés. La majorité des références bibliographiques consultées se limitent à l'application de la théorie de Mie à une sphère homogène.

Dans le cas de la diffusion du rayonnement solaire par les particules atmosphériques, la théorie de Mie est utilisée pour décrire la diffusion des aérosols dont la taille (rayon moyen) varie de 0.1 à 10 fois la longueur d'onde de la gamme optique (visible et PIR). Selon la théorie de Maxwell, les champs électrique et magnétique ( $\xi, \beta$ ) sont la solution de l'équation de propagation de l'onde électromagnétique :

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \eta^2 \Psi = 0 \quad (\text{A2.f})$$

avec  $k = 2\pi/\lambda$  représente le nombre d'onde et  $\eta$  l'indice de réfraction du milieu de propagation.

Pour une onde se propageant selon la direction Z, la théorie de Maxwell montre que la solution de cette équation est une onde électromagnétique de forme sinusoïdale dont les composantes sont :

- Un champ électrique  $\xi$  perpendiculaire à la direction de propagation de la forme :

$$\xi = \xi_0 \exp(-ikz) \exp(i\omega t) i_x$$

- Un champ magnétique  $\beta$  perpendiculaire à  $\xi$  et à la direction de propagation de la forme :

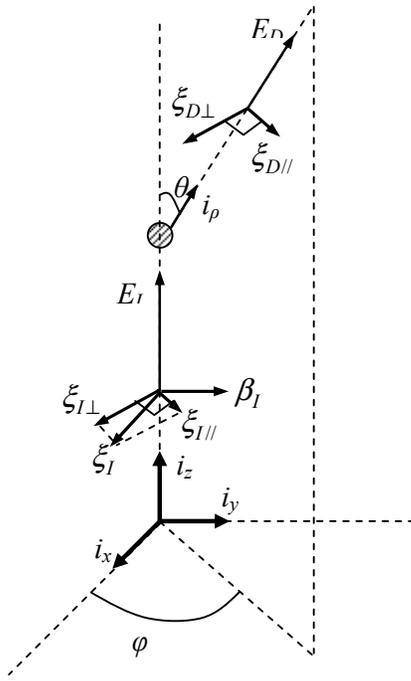
$$\beta = -\frac{\xi_0}{c} \exp(-ikz) \exp(i\omega t) i_y$$

Les directions (X,Y,Z) (dotés des vecteurs unitaires  $i_x, i_y, i_z$ ) forment un trièdre droit (axes 3D orthogonaux).

Ce champ électromagnétique est justement la lumière solaire impliquée dans le processus de diffusion étudié dans cette annexe. La coordonnées z s'exprime dans les coordonnées polaire :  $(\rho, \theta, \varphi)$  par :  $z = \rho \cos(\theta)$ .

Pour une telle onde électromagnétique  $E_I$  ( $\xi_I, \beta_I$ ) incidente sur une particule sphérique (d'aérosol) de rayon  $r$  et d'indice de réfraction  $n$ , l'onde est diffusée  $E_D$  ( $\xi_D, \beta_D$ ) dans toutes les directions ( $\theta, \varphi$ ). Le calcul de l'onde diffusée est basé sur le principe de continuité de l'onde incidente et de l'onde diffusée dans les conditions aux limites, c'est à dire à  $\rho=r$ .

Pour une direction de diffusion définie par l'angle zénithal  $\theta$  et le plan de diffusion défini par l'angle azimutal  $\varphi$ , le champ électrique incident doit être décomposé en une composante parallèle au plan de diffusion  $\xi_{I//}$  et une composante perpendiculaire à ce plan  $\xi_{I\perp}$ . La théorie de Mie démontre que le champ électromagnétique diffusé est (figure A2.e) :



- $X, Y, Z$  : axes du repère cartésien
- $X, y, z$  : coordonnées dans le repère cartésien
- $i_x, i_y, i_z$  : vecteurs unitaires du repère cartésien
- $\rho, \theta, \varphi$  : coordonnées dans le repère sphérique
- $E_I$  : radiance incidente
- $E_D$  : radiance diffusée
- $\xi_I$  et  $\beta_I$  : champs électrique et magnétique de la radiance incidente
- $\xi_{I\perp}$  et  $\xi_{I//}$  : composantes de  $\xi_I$  perpendiculaire et parallèle au plan de diffusion
- $\xi_{D\perp}$  et  $\xi_{D//}$  : composantes de  $\xi_D$  perpendiculaire et parallèle au plan de diffusion
- $k$  : nombre d'onde
- $\omega$  : pulsation de l'onde ( $\omega=2\pi\nu$ ,  $\nu$  est sa fréquence)
- $r$  : rayon de la particule
- $\eta$  : indice de réfraction de la particule
- $\chi$  : paramètre de taille de Mie ( $\chi=2\pi r/\lambda$ )

Figure A2.e. Diffusion de l'onde électromagnétique par une particule sphérique (d'aérosol).

$$\xi_{D//} = \frac{i}{k\rho} \exp(-ik\rho) s_2(\theta) \xi_{I//} \quad ; \quad \xi_{D\perp} = \frac{i}{k\rho} \exp(-ik\rho) s_1(\theta) \xi_{I\perp}$$

avec  $S_1$  et  $S_2$  deux fonctions modulant, respectivement l'amplitude des composantes perpendiculaire et parallèle (au plan de diffusion) du rayonnement diffusé:

$$s_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)]$$

$$s_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \tau_n(\cos\theta) + a_n \pi_n(\cos\theta)]$$

où  $\tau_n$  et  $\pi_n$  sont deux fonctions angulaires qui dépendent seulement de l'angle de diffusion  $\theta$  :

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos\theta) ; \pi_n(\cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta} P_n^1(\cos\theta)$$

avec  $P_n^l(\cos\theta)$  polynôme de Legendre d'ordre 1. Le polynôme de Legendre est donné par :

$$P_n^m(\mu) = \frac{(1-\mu^2)^{m/2}}{2^n n!} \frac{d^{n+m}}{d\mu^{n+m}} (\mu^2-1)$$

où  $\mu = \cos(\theta)$ . Pour plus de détails, voir [Liou 2002, Annexe E; Petty 2006, annexe A].

En pratique, le calcul de  $\tau_n$  et  $\pi_n$  se fait grâce à des expressions récurrentes, celles-ci sont données dans l'annexe 3 (code 6S).

Les coefficients de Mie  $a_n$  et  $b_n$  correspondent respectivement aux oscillations magnétiques et électriques, ils sont dérivés des conditions aux limites à la surface de la particule sphérique. Ils sont donnés par des expressions contenant des fonctions de Bessel ( $j_n$ ) et de Hankel ( $h_n$ ) :

$$a_n = \frac{[\chi j_n(\chi)]' j_n(\eta\chi) - [\eta\chi j_n(\eta\chi)]' j_n(\chi)}{[\eta\chi j_n(\eta\chi)]' h_n(\chi) - [\chi h_n(\chi)]' j_n(\chi)}$$

$$b_n = \frac{[\eta\chi j_n(\eta\chi)]' j_n(\chi) - \eta^2 [\chi j_n(\chi)]' j_n(\eta\chi)}{\eta^2 [\chi h_n(\chi)]' j_n(\eta\chi) - [\eta\chi h_n(\eta\chi)]' h_n(\chi)}$$

Les fonctions  $j_n$  et  $h_n$  sont exprimés à l'aide de cas particuliers de la fonction cylindrique générale notée  $Z_{n+1/2}$  par :

$$j_n(\chi) = \sqrt{\frac{\pi}{2\chi}} Z_{n+1/2}(\chi) \quad \text{lorsque } \chi \rightarrow 0$$

$$h_n(\chi) = \sqrt{\frac{\pi}{2\chi}} Z_{n+1/2}(\chi) \quad \text{lorsque } \chi \rightarrow \infty$$

L'intensité de l'onde diffusée correspondant est donnée par :

$$I_{D//} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} |S_2|^2 E_{I//}$$

$$I_{D\perp} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} |S_1|^2 E_{I\perp}$$

Comme l'onde incidente est incohérente (lumière solaire), alors  $E_{I//}=E_{I\perp}=E_I/2$ . Ainsi :

$$I_D = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (|S_1|^2 + |S_2|^2) E_I$$

Nous pouvons donc identifier la fonction de diffusion :  $f(\theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (|S_1|^2 + |S_2|^2)$

Le coefficient de diffusion est obtenu en intégrant la fonction de diffusion dans toutes les directions de l'espace :

$$\sigma_d^{part} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\theta) \sin\theta \, d\theta \, d\varphi = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)$$

Le **facteur efficace de diffusion** de la particule est défini tel que :  $\sigma_d^{part} = \pi r^2 Q_d$ , il vaut

$$\text{alors : } Q_d = \frac{2}{\lambda^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)$$

Comme les particules présentent tout de même une certaine part d'absorption ( $\eta$  complexe) se traduisant par un facteur d'absorption  $\sigma_a^{part}$ , le **coefficient d'extinction** est selon le principe de conservation d'énergie :  $\sigma_e^{part} = \sigma_d^{part} + \sigma_a^{part}$

Il correspond à la partie réelle de l'indice de réfraction et est donné par :

$$\sigma_e^{part} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n)$$

L'albédo de simple diffusion de la particule est défini par :  $\omega = \sigma_d^{part} / \sigma_e^{part}$ .

La fonction de phase des particules est la distribution dans l'espace de l'énergie diffusée par la particule :

$$P(\theta) = \frac{\lambda^2}{2\pi\sigma_d^{part}} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (\text{A2.g})$$

Autre paramètre défini comme le premier moment de la fonction de phase, il s'agit du facteur d'asymétrie qui donne une idée sur la direction vers laquelle l'essentiel des photons sont diffusés. Si la majorité des photons sont diffusés vers l'avant alors  $g > 1$ , s'ils sont diffusés vers l'arrière alors  $g < 1$ .

$$g = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\theta) \cos(\theta) \sin(\varphi) d\theta d\varphi \quad (\text{A2.h})$$

### **Comparaison avec les résultats de la théorie de Rayleigh**

Si  $\chi \ll 1$ ,  $b_l$  est très grand devant  $a_n$  et  $b_n$ , ce qui nous donne des résultats équivalents au cas de l'oscillation d'un dipôle de l'approximation apportée par la théorie de Rayleigh.

### **A2-4. Diffusion par plusieurs particules**

Le problème de la diffusion multiple sera traité à part, il fait appel à la notion de transfert radiatif dont l'équation est résolue par différentes approches. Celles-ci sont présentées dans l'annexe 3.

### **Références**

- Chandrasekhar, 1960, Radiative Transfer. Dover Publications Inc., New York.
- Deirmendjian, 1969, Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions. Elsevier Science Ltd.
- Lenoble J., 1986, Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures, Deepak Publications.
- Lenoble J., 1993, Atmospheric Radiative Transfer, Deepak Publications.
- Liou K.N, 2002, An Introduction to Atmospheric Radiation, Academic Press, International Geophysics Series Vol. 84.
- Petty G.W., 2006, A First Course In Atmospheric Radiation, Sundog Publishing.
- Van De Hulst, (1957 réédité 1981), Light Scattering by Small Particles. Dover Publications Inc., New York.

## ANNEXE 3 - Diffusion multiple et Transfert Radiatif

### A3-1. Diffusion multiple

La diffusion simple reste prépondérante si deux conditions sont vérifiées : un trajet optique très fin ( $\tau \ll 1$ ) et un albédo de diffusion très faible ( $\omega \ll 1$ ). Dans les autres cas, le problème de diffusion multiple doit être considéré (Petty, 2006, p332). Les particules (molécules de gaz et aérosols) atmosphériques sont séparées par des distances assez élevées par rapport à leur taille de telle sorte que chaque particule diffuse la lumière incidente exactement comme si les autres particules étaient inexistantes (Liou, 2002, p8). C'est la notion de diffusion indépendante. Ce principe (ou hypothèse) simplifie considérablement l'étude de la diffusion de la lumière par une multitude de particules car elle permet d'utiliser les grandeurs énergétiques plutôt que les champs électromagnétiques dans l'étude de la diffusion multiple.

Dans un élément de volume contenant plusieurs particules, chacune de ces particules est exposée à, et diffuse aussi, la lumière qui a déjà été diffusée par d'autres particules. La figure A3.a illustre un exemple où, dans un élément de volume  $dV$ , la particule « A » diffuse la lumière dans toutes les directions, mais après une seule diffusion la lumière quitte le volume  $dV$  vers la direction  $\theta$ , on parlera alors de diffusion simple. Une partie de la lumière diffusée par la particule « A » atteint la particule « B » qui la diffuse une seconde fois vers l'extérieur de  $dV$  dans la direction  $\theta$ , c'est une diffusion secondaire. La particule « C » exerce une diffusion du troisième ordre et ainsi de suite. Dès qu'il y a plus d'une seule diffusion (simple), on parlera de diffusion multiple. Remarquons qu'une partie de la lumière issue de  $dV$  se retrouve dans la même direction de la lumière incidente.

La diffusion multiple est un processus important dans le transfert de la radiation dans l'atmosphère. Pour l'étude de la diffusion multiple, il serait intéressant de modéliser le trajet de chaque photon en interaction, dans un espace 3D, avec l'ensemble des particules se trouvant dans son chemin et ce en fonction d'une distribution de probabilité adéquate (approche Monte Carlo). Toutefois, il faudra considérer un nombre très élevé de photons, de particules et de diffusions simples successives pour pouvoir atteindre un résultat reflétant la réalité, ce qui rend le problème très sophistiqué et nécessiterais une capacité de calcul très élevée pour des simulations sur un ordinateur.

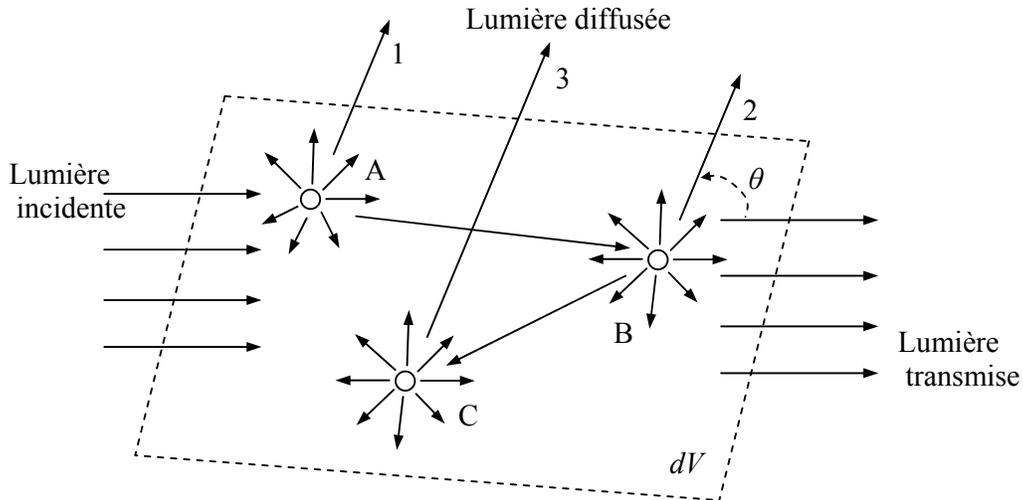


Figure A3.a. Processus de diffusion multiple impliquant un premier ordre (A), un deuxième ordre (B) et un troisième ordre de diffusion dans la direction  $\theta$ .

Ainsi, plutôt que de considérer chacune des particules à part, la modélisation s'effectue en établissant le bilan énergétique des radiances mise en jeu dans le volume  $dV$ . Pour ce faire, deux phénomènes qui ont lieu dans cet élément de volume doivent être pris en compte : la réduction de radiance due à l'atténuation par extinction (par diffusion et absorption) et l'augmentation due à la diffusion multiple de la radiance (directe et diffuse, composantes 1, 2 et 3 de la figure A3.a). Ceci nous mène à poser l'équation de transfert radiatif.

### A3-2. Équation de transfert radiatif

Puisque l'atmosphère est un système physique fortement dynamique, le bilan radiatif qui permettra de poser l'ÉTR devrait se faire pour un élément de volume  $dV$  de l'atmosphère surtout que les phénomènes d'absorption et de diffusion dépendent de paramètres variables en fonction de la pression, de la densité et du type des particules, du temps, etc. Toutefois, et afin de ne pas avoir à traiter inutilement un problème multidimensionnel, il est souvent accepté d'assumer que l'atmosphère est stratifiée horizontalement, les phénomènes sont fonctions de la hauteur  $z$  seulement. On parlera donc de  $dz$  ou de son équivalent en épaisseur optique  $d\tau$  plutôt que de  $dV$ .

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la variation infinitésimale que subit la radiation en traversant l'élément d'épaisseur  $dz$  est la résultante atténuation d'absorption et de

diffusion et d'une augmentation générée dans l'élément  $dz$  à cause de la diffusion (multiple) et elle quitte cet élément  $dz$  dans une direction donnée (voir figure A3.a). On écrit donc :

$$dL(z,\theta,\phi) \cos(\theta) = -\sigma_e dz L(z,\theta,\phi) + \sigma_e dz \frac{\omega(z)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(z,\theta,\phi,\theta',\phi') L(z,\theta',\phi') d\theta' d\phi' \quad (\text{A3.a})$$

avec :

$\sigma_e$  : coefficient d'extinction

$\omega$  : albédo de simple diffusion, c'est la probabilité qu'un photon soit diffusé lorsqu'il percute une particule (ex. 90% diffusion, 10% absorption),

$P(z,\theta,\phi,\theta',\phi')$  : fonction de phase caractérisant la probabilité qu'un photon soit diffusé dans une direction  $(\theta',\phi')$  lorsqu'il provient de la direction  $(\theta,\phi)$ .  $P(\cdot)$  dépend de l'angle entre la direction d'incidence et la direction de diffusion.

La coordonnée  $z$  est remplacée une propriétés optique qui lui est proportionnelle, c'est l'épaisseur optique  $\tau$  (parfois noté  $\delta$  également) qui vaut :  $\tau_e = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_e dz$ . Et en notant aussi  $\mu = \cos(\theta)$ , l'équation de transfert radiatif devient :

$$\mu \frac{dL(\tau,\mu,\phi)}{d\tau} = L(\tau,\mu,\phi) - \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\mu,\phi,\mu',\phi') L(\tau,\mu',\phi') d\mu' d\phi' \quad (\text{A3.b})$$

Cette équation différentielle-intégrale peut être expliquée ainsi : le terme de gauche exprime le taux de changement de la radiance dans la direction  $(\mu,\phi)$ , le premier terme de droite désigne l'atténuation de radiance dans la direction  $(\mu,\phi)$  due à l'absorption et à la diffusion et le second terme de droite représente le gain de radiance du à la diffusion de toutes les directions  $(\mu',\phi')$  de la radiance provenant de la direction  $(\mu,\phi)$ .

Par ailleurs, on associe toujours cette équation de transfert à deux conditions aux limites, l'une en haut de l'atmosphère et l'autre au niveau du sol. En effet, l'équation de transfert ne peut être résolue sans ces deux conditions. En haut de l'atmosphère :

$$L(\tau_i, -\mu, \phi) = \delta(\mu - \mu') \delta(\phi - \phi') \pi E_s \quad (\text{A3.c})$$

Avec :

$\delta$  : fonction de Dirac indiquant la direction  $(\mu',\phi')$ ,

$\pi E_s$  : flux solaire incident,

$\tau_i$  : épaisseur optique totale de l'atmosphère,

Au niveau du sol :

$$L(0, \mu, \phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^0 R(\mu, \phi, \mu', \phi') L(\mu', \phi') \mu' d\mu' d\phi' \quad (\text{A3.d})$$

Où  $R(\cdot)$  est la Fonction de Distribution de la Réflectance Bidirectionnelle caractérisant la surface de la cible.

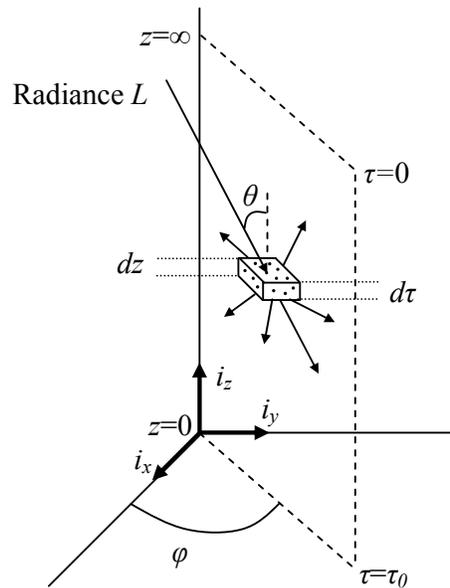


Figure A3.b. Transfert radiatif de la radiance  $L$  à travers une couche d'atmosphère  $dz$ .

### A3-3. Résolution de l'équation de transfert radiatif

L'équation différentielle-intégrale de transfert radiatif indique que pour déterminer la radiance  $L(\mu, \phi)$  à un niveau  $\tau$ , on doit connaître simultanément  $L(\mu', \phi')$  pour toutes les valeurs de  $\mu'$  et de  $\phi'$  et pour les autres valeurs de  $\tau$ . De plus, les conditions aux limites imposent également la connaissance de la réflectivité de la surface qui est souvent anisotropique. L'équation A3.b n'a donc pas de solution analytique exacte sauf si on pose des suppositions non réalistes sur la fonction de phase (isotropie). La solution est donc de développer des techniques permettant d'avoir des solutions numériques appropriées pour les problèmes pratiques.

Les méthodes de résolution de l'ÉTR sont nombreuses, la majorité est basée sur un développement analytique suivi de calculs numériques dont la complexité dépend de la précision ciblée. Certaines méthodes proposent des solutions analytiques complètes mais au prix de simplifications, notamment en supposant que la diffusion atmosphérique est isotropique et homogène ou en négligeant les diffusions multiples.

Certaines méthodes de résolution de l'ÉTR sont plus célèbres que d'autres et ont servi à développer des codes atmosphériques et des algorithmes de corrections atmosphériques. Dans notre contexte, nous n'allons présenter que les méthodes (numériques) qui ont connu le plus de succès, notamment, la méthode des ordres successifs de diffusion qui est à la base du code atmosphérique 6S que nous avons adopté pour développer notre algorithme. (Voir Lenoble 1985, Liou 2002, Liang, 2004, pour une liste complète de ces méthodes).

### A3-3-a. Méthode « Two-Stream »

La méthode « Two Stream » (ou deux flux) est une technique analytique approximative basée sur la décomposition de la radiance en deux flux en opposition, l'intégrale de l'ÉTR est donc remplacée par la sommation de ces deux flux. Cette méthode est un cas particulier de la méthode des ordonnées discrètes qui peut être considérée comme une méthode N-Stream.

### A3-3-b. Méthode des ordonnées discrètes

L'idée des ordonnées discrètes est de remplacer les intégrales dans l'équation de transfert radiatif par des sommations, la radiance est ainsi calculée pour un nombre fini de directions. Ainsi, après la quantisation des angles azimutal ( $\phi_k, k=1..M$ ) et zénithal ( $\mu_i, i=1..N$ ), on peut écrire pour un angle azimutal donné :

$$\mu_i \frac{dL(\tau, \mu_i)}{d\tau} = L(\tau, \mu_i) - \frac{\omega}{2} \sum_{j=0}^N a_j P(\mu_i, \mu_j) L(\tau, \mu_j) - \frac{\omega}{4\pi} P(\mu_i, \mu') E_s \exp\left(\frac{\tau}{\mu'}\right) \quad (\text{A3.e})$$

L'ÉTR est ainsi transformée en un système algébrique de N équations différentielles indépendantes qu'il est possible de résoudre grâce à des techniques d'algèbre linéaire de calcul de vecteurs propres calculables sur ordinateur. Il est toutefois nécessaire d'exprimer la fonction de phase sous la forme d'une série de polynômes de Legendre et de diviser l'atmosphère en couches homogènes  $d\tau$ . Dans ce cas, la solution est de la forme :

$$L(\tau, \mu_i) = \sum_{l=0}^N k_l g_l(\nu_l) \exp(\tau \nu_l) + h_l \exp\left(\frac{\tau}{\mu'}\right) \quad (\text{A3.f})$$

Les fonctions  $g_l(\nu_l)$  et  $\exp(\tau \nu_l)$  sont les solutions du système associé aux équations (A3.e), les N valeurs  $\nu_l$  les vecteurs propres de la matrice des  $a_{ij}$  et les  $k_l$  sont des coefficients déterminés à partir des conditions aux limites.

Cette technique à été implémentée dans plusieurs codes atmosphériques notamment , STREAMER, et MODTRAN

### A3-3-c. Méthode des ordres successifs de diffusion (SOS)

C'est la méthode utilisée par le code 6S. Le concept de cette approche est relativement simple et nécessite moins de développements mathématiques par rapport à la méthode des ordonnées discrètes. L'idée de base est de calculer la radiance diffuse associée aux photons diffusés une seule fois  $L^{(1)}$  (1<sup>er</sup> ordre), deux fois  $L^{(2)}$  (2<sup>ème</sup> ordre), trois fois  $L^{(3)}$  (3<sup>ème</sup> ordre) et ainsi de suite. La radiance totale sera la somme des radiances de tous les ordres de diffusion, soit :

$$L(\tau, \mu, \phi) = \sum_{n=1}^{\infty} L^{(n)}(\tau, \mu, \phi) \quad (\text{A3.g})$$

Pour l'ordre (1), c'est à dire dans le cas d'une seule diffusion (simple), l'équation de transfert radiatif (A3.b) devient :

$$\mu \frac{dL^{(1)}(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = L^{(1)}(\tau, \mu, \phi) - \frac{\omega}{4\pi} P(\mu, \phi, \mu', \phi') E_s \exp\left(-\frac{\tau_i - \tau}{\mu'}\right) \quad (\text{A3.h})$$

C'est une équation différentielle ordinaire qui accepte une solution analytique. À cause des conditions aux limites (en haut et en bas de la couche atmosphérique analysée), il est nécessaire de distinguer le cas de la direction descendante du cas où la radiance est ascendante.

Dans la direction descendante :

$$L^{(1)}(\tau, -\mu, \phi) = \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau} \left( \frac{\omega}{4\pi} P(\mu, \phi, \mu', \phi') \right) E_s \exp\left(\frac{\tau'}{\mu}\right) \exp\left(-\frac{\tau' - \tau}{\mu}\right) d\tau' \quad (\text{A3.i})$$

$$L^{(1)}(\tau, -\mu, \phi) = \frac{\omega \mu' E_s}{4\pi(\mu - \mu')} P(\mu, \phi, \mu', \phi') \left( \exp\left(-\frac{\tau}{\mu}\right) - \exp\left(-\frac{\tau}{\mu'}\right) \right) \quad (\text{A3.j})$$

Pour les valeurs faibles de l'épaisseur optique, ( $\tau \ll 1$ ), l'approximation suivante de la fonction exponentielle peut être adoptée :  $L^{(1)}(\tau, -\mu, \phi) = -\frac{\omega \tau E_s}{4\pi \mu} P(\mu, \phi, \mu', \phi')$

Dans la direction ascendante :

$$L^{(1)}(\tau, \mu, \phi) = \frac{1}{\mu} \int_{\tau}^{\tau_i} \left( \frac{\omega}{4\pi} P(\mu, \phi, \mu', \phi') \right) E_s \exp\left(\frac{\tau'}{\mu}\right) \exp\left(-\frac{\tau' - \tau}{\mu}\right) d\tau' \quad (\text{A3.k})$$

$$L^{(1)}(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega \mu' E_s}{4\pi(\mu - \mu')} P(\mu, \phi, \mu', \phi') \exp\left(\frac{\tau_i}{\mu}\right) \left( \exp\left(-\frac{\tau_i - \tau}{\mu}\right) - \exp\left(-\frac{\tau_i - \tau}{\mu'}\right) \right) \quad (\text{A3.l})$$

Pour les valeurs faibles de l'épaisseur optique, ( $\tau \ll 1$ ), l'approximation suivante de la fonction exponentielle peut être adoptée :  $L^{(1)}(\tau, \mu, \phi) = -\frac{\omega(\tau_i - \tau)E_s}{4\pi\mu} P(\mu, \phi, \mu', \phi')$

L'ordre de diffusion  $n+1$  est lié à l'ordre précédent  $n$  par la relation suivante :

- Dans la direction descendante :

$$L^{(n+1)}(\tau, -\mu, \phi) = \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau} \left( \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\mu, \phi, \mu', \phi') L^{(n)}(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \right) \exp\left(-\frac{\tau - \tau'}{\mu}\right) d\tau' \quad (\text{A3.m})$$

- Dans la direction ascendante :

$$L^{(n+1)}(\tau, \mu, \phi) = \frac{1}{\mu} \int_{\tau}^{\tau_i} \left( \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\mu, \phi, \mu', \phi') L^{(n)}(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \right) \exp\left(-\frac{\tau' - \tau}{\mu}\right) d\tau' \quad (\text{A3.n})$$

Cette méthode nécessite la division de l'atmosphère, selon  $\tau$ , en plusieurs couches et selon  $(\theta, \phi)$ , en plusieurs angles solides. Les intégrales des équations (A3.m) et (A3.n) sont réalisées par les techniques numériques usuelles.

Les avantages de la méthode des ordres successifs de diffusion sont : (i) une bonne compréhension des phénomènes physiques puisque les photons sont suivis dans chaque processus de diffusion, (ii) la possibilité de traiter les cas d'atmosphères homogène et non homogènes et (iii) la radiance  $L$  peut être calculée pour autant d'épaisseurs optiques et autant de directions qu'on choisit de le faire lors de l'intégration numérique des équations (A3.m) et (A3.n).

## Références

Chandrasekar, 1960, Radiative transfer, Dover publications Inc., New York.

Lenoble J., 1986, Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures, Deepak Publications.

Lenoble J., 1993, Atmospheric Radiative Transfer, Deepak Publications.

Liou K.N., 2002, An Introduction to Atmospheric Radiation, Academic Press, International Geophysics Series, Vol. 84.

Petty G.W., 2006, A First Course In Atmospheric Radiation, Sundog Publishing.

## ANNEXE 4 - Calibration des capteurs et sensibilités spectrales

La calibration des capteurs consiste à calculer la radiance reçue au niveau du satellite à partir de la valeur numérique de l'image brute. De manière générale, les valeurs numériques (VN) sont converties en luminances ( $L$ ), qui sont des grandeurs physiques, à l'aide d'une expression du type :

$$L_k^{sat} = a_k VN_k + b_k \quad (\text{A4.a})$$

$L_k^{sat}$  est la luminance (calibrée) reçue au niveau du satellite pour la bande  $k$ , exprimée en  $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ .  $VN$  est la valeur numérique (0 à 255 pour les capteurs codant les données sur 8 bits).  $VN_k$  étant des valeurs sans unité,  $a_k$  est également exprimé en  $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ .

$L_k^{sat}$  est la moyenne de la luminance spectrale  $L^{sat}(\lambda)$  pondérée par la puissance de l'éclairement solaire spectral  $E_0(\lambda)$  et la sensibilité spectrale  $SS_k(\lambda)$  du capteur dans la bande spectrale  $k$ .  $L_k^{sat}$  se calcule alors par l'expression :

$$L_k^{sat} = \left( \int_{\lambda_{début}}^{\lambda_{fin}} L^{sat}(\lambda) SS_k(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda \right) / \left( \int_{\lambda_{début}}^{\lambda_{fin}} SS_k(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda \right) [\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{A4.b})$$

Les longueurs d'onde  $\lambda_{début}$  et  $\lambda_{fin}$  désignent les limites de la bande spectrale  $k$ .

Les coefficients de calibration  $a$  et  $b$  sont déterminés à partir du gain et de l'offset donnés par les constructeurs. Pour certains capteurs, des valeurs fixes sont préconisées, pour d'autres, la dérive des composants en fonction du temps doit être prise en compte, les coefficients de calibration sont mises à jour par les constructeurs. Puisque les satellites couvrent presque l'ensemble de la planète, les territoires visés ont souvent des réflectances très différentes dans les diverses bandes spectrales, plusieurs gains sont ainsi disponibles sur certains satellites et ce afin d'optimiser la précision des images (meilleur contraste sans saturation).

### A4-1. La série Landsat (Landsat-4 TM, Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM+)

Landsat-1 a été lancé en 1972 avec à son bord le capteur MSS (Multispectral Scanner) avec 4 bandes spectrales spécifiquement conçues pour les applications d'observation de la terre. Landsat-4, lancé en 1982, était doté de deux capteurs, le MSS et le TM (Thematic Mapper) qui avait une meilleure résolution spatiale (30 m pour TM v.s. 60 m pour MSS) et des bandes

spectrales additionnelles (7 plutôt que 4). Le même capteur TM a été lancé sur le satellite Landsat-5 en 1984. Landsat-7 a été lancé en 1999 avec un capteur TM amélioré appelé ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Les capteurs Landsat-4 et 5 TM et Landsat-7 ETM+ sont dotés chacun de huit bandes spectrales (voir tableau A4.a). Les bandes panchromatique et thermique ne sont pas considérées dans notre cas.

Pour les capteurs des satellites Landsat, la luminance est donnée par la formule :

$$L^{sat} = \frac{L_{max} - L_{min}}{VN_{max} - VN_{min}} (VN - VN_{min}) + L_{min} \quad [\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{A4.c})$$

Nous avons donc :  $a = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(VN_{max} - VN_{min})}$  et :  $b = L_{min}$ .

$L_{min}$  et  $L_{max}$  sont les limites inférieure et supérieure de la radiance spectrale quantifiable par le capteur.  $VN_{min}$  et  $VN_{max}$  valent respectivement 0 et 255.

Le tableau A4.a donne les coefficients de calibration pour les bandes spectrales des capteurs TM et ETM+. Pour ETM+, deux valeurs (low et high) du gain sont possibles. Ces valeurs sont fixes car les capteurs sont recalibrés automatiquement par des modules insérés entre le télescope et les détecteurs. La figure A4.a illustre les sensibilités spectrales. Les capteurs TM de Landsat-4 et -5 sont pratiquement similaires, ETM+ présente des légères différences.

Tableau A4.a. Coefficients de calibration des capteurs Landsat-4 TM, Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM+.

	<b>B1 (bleu)</b>	<b>B2 (vert)</b>	<b>B3 (rouge)</b>	<b>B4 (PIR)</b>	<b>B5 (MIR1)</b>	<b>B7 (MIR2)</b>
<b>Landsat4-TM et Landsat5-TM</b>						
$L_{min} = \text{Offset}$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu^{-1}$ )	-1.5	-2.8	-1.2	-1.5	-0.37	-0.15
$L_{max}$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu^{-1}$ )	152.1	296.8	204.3	206.2	27.19	14.38
$a = (L_{max} - L_{min})/255$	0.6024	1.1749	0.8059	0.8145	0.1081	0.0570
<b>Landsat7-ETM en mode gain bas (low gain)</b>						
$L_{min} = \text{Offset}$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu^{-1}$ )	-6.2	-6.4	-5.0	-5.1	-1	-0.35
$L_{max}$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu^{-1}$ )	293.7	300.9	234.4	241.1	47.57	16.54
$a = (L_{max} - L_{min})/255$	1.1761	1.2051	0.9388	0.9655	0.1905	0.0662
<b>Landsat7-ETM en mode gain élevé (high gain)</b>						
$L_{min} = \text{Offset}$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu^{-1}$ )	-6.2	-6.4	-5.0	-5.1	-1	-0.35
$L_{max}$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu^{-1}$ )	191.6	196.5	152.9	157.4	31.06	10.8
$a = (L_{max} - L_{min})/255$	0.7757	0.7957	0.6192	0.6373	0.1257	0.0437

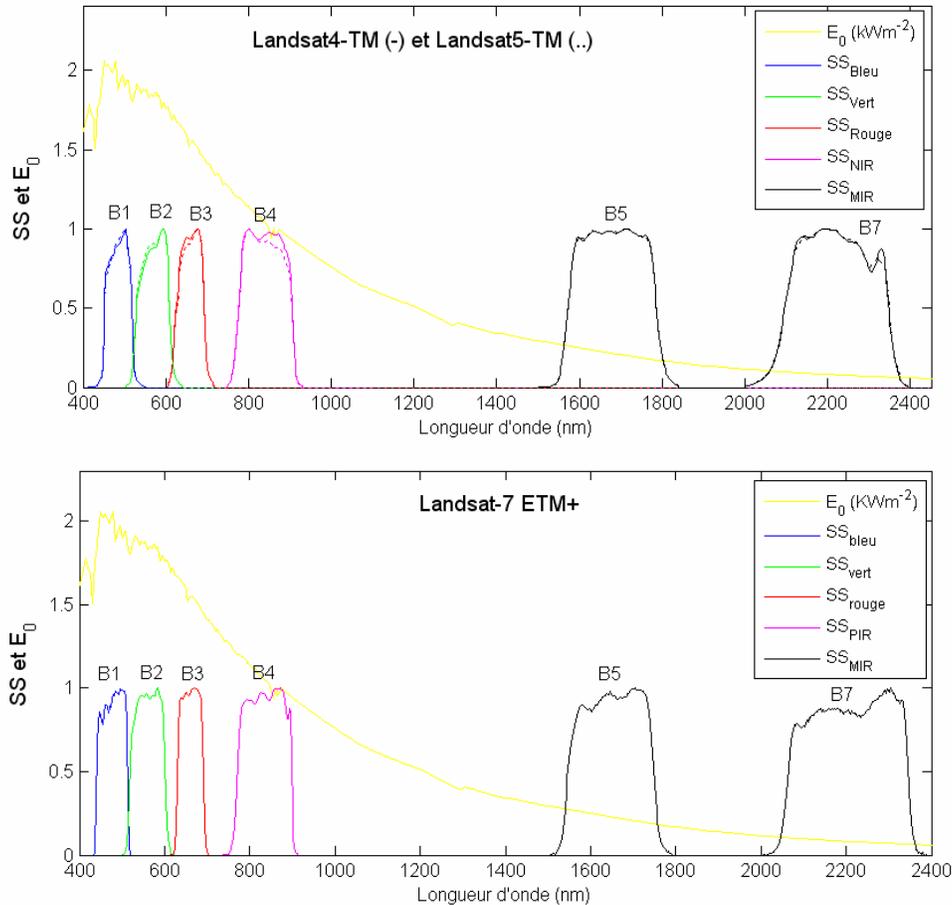


Figure A4.a. Sensibilités spectrales  $SS_k(\lambda)$  des bandes spectrales de Landsat-4 TM, Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM+.

#### A4-2. EO-1 ALI

Le capteur ALI (Advanced Land Imager) monté sur le satellite EO-1 (Earth Observing) est un capteur expérimental lancé par la NASA en 2000 pour assurer la continuité des données de Landsat TM et ETM+. L'amélioration offerte par ALI par rapport à TM/ETM+ consiste en un meilleur rapport signal/bruit, ce qui a permis d'obtenir des données codées sur 16 bits ainsi que l'ajout de trois bandes spectrales supplémentaires dans le domaine optique. La résolution spatiale est maintenue à 30m. Dans le domaine visible, une bande spectrale dans le bleu-violet a été rajoutée et le PIR est divisé en deux bandes plus étroites permettant d'éviter les pics d'absorption de la vapeur d'eau ( $H_2O$ ) situé autour de 820 nm. La bande MIR rajoutée autour de 1100 nm trouve son utilité, entre autres, pour l'étude des forêts (structure, espèces, humidité, ...).

Tableau A4.b. Bandes spectrales du capteur EO-1 ALI.

Bande	MS-1p	MS-1	MS-2	MS-3	MS-4	MS-4p	MS-5p	MS-5	MS-7
	Bleu	Bleu	Vert	Rouge	PIR	PIR	MIR	MIR	MIR
$\lambda_{\text{début}}$	0.433	0.45	0.525	0.633	0.775	0.845	1.2	1.55	2.08
$\lambda_{\text{fin}}$	0.453	0.515	0.605	0.69	0.805	0.89	1.3	1.75	2.35

Le calcul de la luminance à partir des valeurs numériques (16 bits) du capteur ALI se fait à l'aide d'une expression très simple.

$$L^{sat} = \frac{VN}{30 \cdot \Delta\lambda} \quad [\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{A4.d})$$

La division par  $\Delta\lambda$  permet de normaliser par rapport à la longueur d'onde.

Les sensibilités spectrales des bandes du capteur ALI sont illustrées sur la figure A4.b.

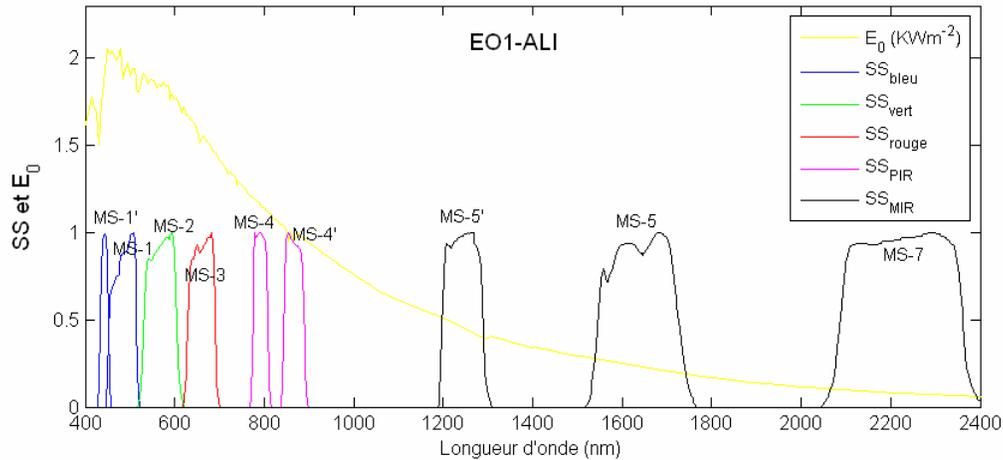


Figure A4.b. Sensibilités spectrales  $SS_k(\lambda)$  des bandes spectrales du capteur EO-1 ALI.

### A4-3. QuickBird

Le capteur QuickBird de DigitalGlobe, fonctionnel depuis octobre 2001, est un satellite commercial qui offre des images de très haute résolution (2.4m avec visée du nadir et 2.8m avec visée à 25°) pour ses 4 bandes multispectrales bleue, verte, rouge et PIR. Les images QuickBird sont acquises en format 11 bits puis recodés et distribués en produits 16 bits ou 8 bits. Le calcul des luminances à partir des valeurs numériques est donnée par :

$$L^{sat} = \frac{absCalFactor}{\Delta\lambda} \cdot VN + offset \quad [\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{A4.e})$$

$\Delta\lambda$  est la largeur de la bande spectrale, elle vaut 0.068  $\mu\text{m}$  pour la bande bleue, 0,099  $\mu\text{m}$  pour la bande verte, 0.071  $\mu\text{m}$  pour la bande rouge et 0.114  $\mu\text{m}$  pour le PIR. Les valeurs du

facteur *absCalFactor* (absolute calibration factor) dépendent fortement du recodage des données du format 11 bits vers le format 16 bits ou le format 8 bits. Ils sont données en  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$  dans les fichiers d'entête « .IMD » qui accompagnent l'image. La figure A4.c montre les sensibilités spectrales des quatre bandes du capteur QuickBird.

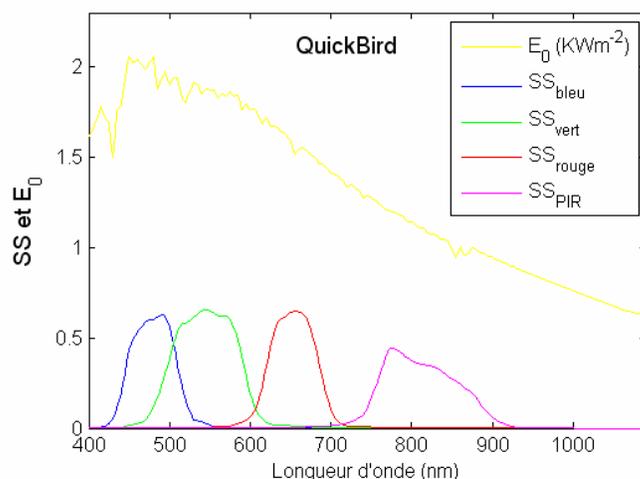


Figure A4.c. Sensibilités spectrales  $SS_k(\lambda)$  des bandes spectrales du capteur QuickBird.

#### A4-4. Terra – ASTER

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) est un capteur japonais qui fut lancé en décembre 1999 à bord du satellite Terra dans le cadre du projet EOS (Earth Observation System) de la NASA. ASTER est doté de 14 bandes dont 2 se trouvent dans le domaine visible, 2 dans le PIR et 6 dans le MIR. Le reste des bandes spectrales se trouvent dans l'infrarouge thermique (figure A4.d). La résolution spatiale est de 15 m dans le visible et le PIR et de 30 m dans le MIR. La luminance  $L^{sat}$  est calculée par l'équation :

$$L^{sat} = \frac{A}{G} \cdot VN + D \quad [\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{A4.f})$$

$A$  est un coefficient linéaire,  $G$  est un facteur de gain et  $D$  est l'offset.

Le tableau A4.c donne, selon la version 1 du guide d'utilisateur des images ASTER (Abrams and Hook 1998), les valeurs originales du coefficient  $a$  ( $=A/G$ ) pour les différentes configurations du gain de l'amplificateur. Les valeurs du coefficient  $b$  sont nulles. Des valeurs plus précises de  $A$ ,  $G$  et  $D$  sont fournies dans les fichiers HDF qui accompagnent les images.

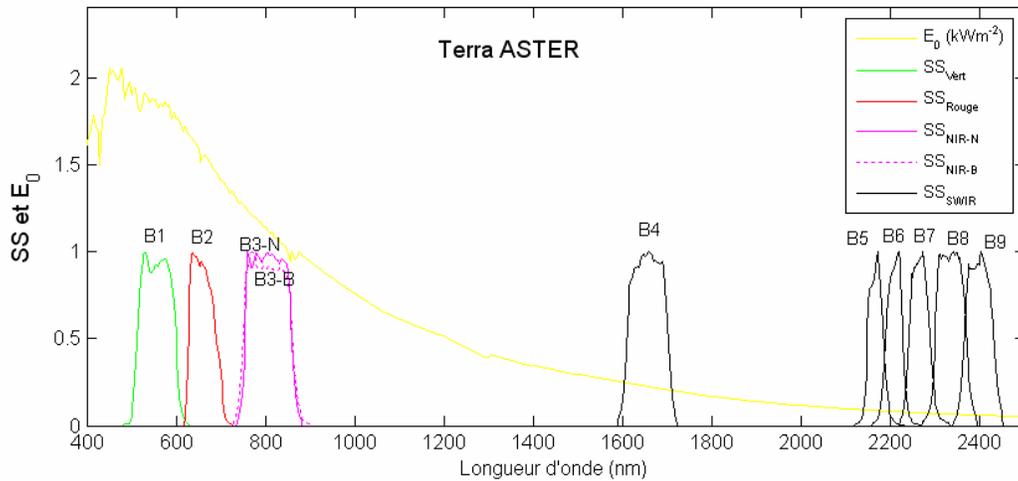


Figure A4.d. Sensibilités spectrales  $SS_k(\lambda)$  des bandes spectrales du capteur ASTER.

Tableau A4.c. Propriétés des bandes spectrales du capteur ASTER.

Bande	Limites ( $\mu\text{m}$ )	Gain ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )				$E_0$ ( $\text{Wm}^{-2}$ )
		Haut	Normal	Bas 1	Bas 2	
1 (vert)	0.52 - 0.60	0.676	1.688	2.25	-	1847
2 (rouge)	0.63 - 0.69	0.708	1.415	1.89	-	1553
3N (PIR du nadir)	0.78 - 0.86	0.423	0.862	1.15	-	1118
3B (PIR backward)	0.78 - 0.86	0.423	0.862	1.15	-	1118
4 (MIR)	1.60 - 1.70	0.1087	0.2174	0.2900	0.2900	232.5
5 (MIR)	2.145 - 2.185	0.0348	0.0696	0.0925	0.4090	80.32
6 (MIR)	2.185 - 2.225	0.0313	0.0625	0.0830	0.3900	74.92
7 (MIR)	2.235 - 2.285	0.0299	0.0597	0.0795	0.3320	69.20
8 (MIR)	2.295 - 2.365	0.0209	0.0417	0.0556	0.2450	59.82
9 (MIR)	2.360 - 2.430	0.0159	0.0318	0.0424	0.2650	57.32

#### A4-5. Ikonos

Après la perte du satellite Ikonos-1 quelques minutes après son lancement en avril 1999, le satellite commercial de GeoEye Ikonos-2 a été lancé en septembre 1999. Les images Ikonos, disponibles depuis janvier 2000, sont fournies par Space Imaging. Le capteur multispectral d'Ikonos acquiert des images dans les bandes bleue, verte, rouge et PIR (figure A4.e.) avec une résolution spatiale de 3.28m à une visée du nadir. L'angle de visée peut atteindre jusqu'à 45°. La luminance spectrale reçue au niveau du capteur Ikonos s'écrit :

$$L_{sat} = \frac{VN}{CalCoef(\lambda_{fin} - \lambda_{début})} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{A4.g})$$

La division par  $\lambda_{fin} - \lambda_{début}$  permet de normaliser par rapport à la longueur d'onde.

Les images Ikonos sont acquises en format 11 bits, elles sont distribuées en format original 11 bits ou alors requantifiées en format 8 bits. Le tableau A4.d donne les valeurs de  $CalCoef$ , ( $\lambda_{fin} - \lambda_{début}$ ) et de la valeur du  $Gain$  (équation A4.a) pour les deux formats 8 et 11 bits. Ces valeurs sont différentes avant et après le 22 février 2001 d'après Flemint (2003) et Thenkabail *et al.* (2004), et ce pour des raisons de dérive des composants.

Tableau A4.d. Propriétés spectrales du capteur Ikonos.

		$CalCoef$ ( $Wm^{-2}sr^{-1}$ ) <sup>-1</sup>		$\lambda_{début}$ (nm)	$\lambda_{fin}$ (nm)	$Gain$ ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu^{-1}$ )		$E_0$ ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ )
		avant	après			avant	après	
Avant ou après le 22-02-2001								
Images 11 bits	Bande bleue (MS-1)	63.3	72.8	444.7	516.0	0.222	0.193	1939.4
	Bande verte (MS-2)	64.9	72.7	506.4	595.0	0.174	0.155	1847.4
	Bande rouge (MS-3)	84.0	94.9	631.9	697.7	0.181	0.160	1536.4
	Bande PIR (MS-4)	74.6	84.3	757.3	852.7	0.141	0.124	1147.8
Images 8 bits	Bande bleue (MS-1)	7.9	9.1	444.7	516.0	1.775	1.541	1939.4
	Bande verte (MS-2)	8.1	9.1	506.4	595.0	1.393	1.240	1847.4
	Bande rouge (MS-3)	10.5	11.9	631.9	697.7	1.447	1.277	1536.4
	Bande PIR (MS-4)	9.3	10.5	757.3	852.7	1.127	0.998	1147.8

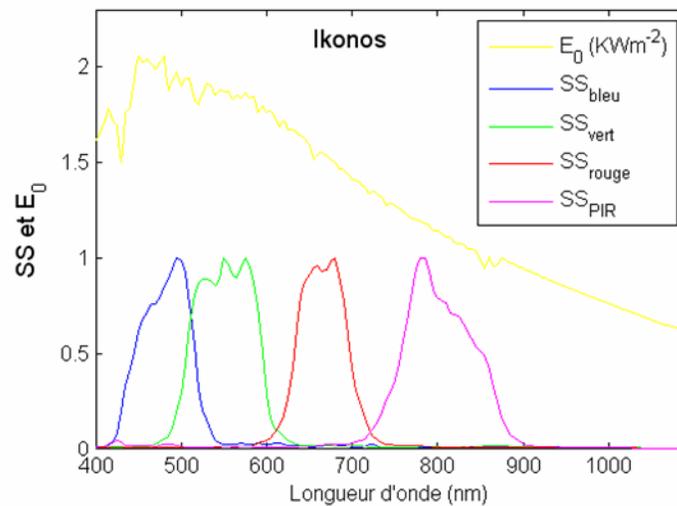


Figure A4.e. Sensibilités spectrales  $SS_k(\lambda)$  des bandes spectrales du capteur Ikonos.

#### A4-7. Les satellites SPOT

La série des satellites français SPOT a vu le jour en février 1986, date de lancement de SPOT1 à bord de la navette Ariane. SPOT 2 l'a rejoint en orbite en janvier 1990, suivi de SPOT 3 en septembre 1993. Les capteurs « haute résolution » ou HR de la première série SPOT 1, 2 et 3 étaient dotés de trois bandes multispectrales (vert, rouge et PIR) à 20 m de résolution. SPOT 4 a été lancé en mars 1998 et SPOT 5 en mai 2002. Les instruments HR de ces satellites (2 HRVIR sur SPOT 4 et 2 HRG sur SPOT 5) comportent une bande MIR en plus des trois bandes vert, rouge et PIR. La résolution des bandes vert, rouge et PIR a été raffinée à 10 m sur SPOT 5. Les satellites SPOT offrent la possibilité de la visée hors nadir, entre  $-31^\circ$  et  $+31^\circ$ , ce qui permet d'atteindre une répétitivité de 2 à 3 jours pour le même endroit. Les données issues des instruments HR de SPOT sont codées sur 8 bits. La continuité du système SPOT sera assurée par une nouvelle génération de satellites, tels que Formosat et Vénus (Hagolle *et al.* 2008).

Pour la calibration des images SPOT (1 à 5), la relation entre la luminance et la valeur numérique est donnée par :

$$L_k = VN_k / (A_k G_{m,k}) \quad (\text{A4.h})$$

Ainsi,  $a = 1/(A_k G_{m,k})$  et  $b$  est nul.  $A_k$  ( $\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$ ) est le coefficient de calibration absolue et  $G_{m,k}$  le coefficient analogique de gain lié à l'angle de visée. L'indice  $k$  désigne la bande spectrale et  $m$  est un nombre correspondant au gain de visée (viewing gain number).  $G_{m,k}$  peut prendre huit valeurs ( $m = 1$  à  $8$ ) d'amplification du signal pour SPOT 1 et 2, six valeurs pour SPOT 4 et dix valeurs pour SPOT 5 ( $G_{m,k} = 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.6, 2.2, 2.8, 3.8, 4.8$  ou  $6.2$ ). Le coefficient  $A_k$  varie en fonction du temps. Le tableau A4.e donne une idée sur les valeurs préconisées par SPOT Image aux dates indiquées. Pour les corrections atmosphériques précises, nous utiliserons les valeurs du produit  $A_k G_{m,k}$  sont fournies avec l'image dans le fichier d'entête.

Les graphiques de la figure A4.f montrent les sensibilités spectrales des différents capteurs des satellites SPOT.

Tableau A4.e. Coefficients de calibration ( $A_k$  en  $W^{-1}.m^2.sr.\mu m$ , voir équation A4.h) des capteurs des satellites SPOT à des dates récentes.

		B1 (vert)	B2 (rouge)	B3 (PIR)	B4 (MIR)
SPOT 1 Oct. 2001	HRV1	0.329	0.269	0.489	-
	HRV2	0.322	0.304	0.510	-
SPOT 2 Juin 2006	HRV1	0.3934	0.3630	0.7378	-
	HRV2	0.4536	0.3637	0.7362	-
SPOT 4 Juin 2006	HRVIR1	0.64004	0.83189	0.87558	6.13755
	HRVIR2	0.60075	0.80672	0.90376	5.44363
SPOT 5 Juin 2006	HRG1	0.8234	0.9977	1.0876	6.3242
	HRG2	0.7542	1.0145	1.0795	6.2993

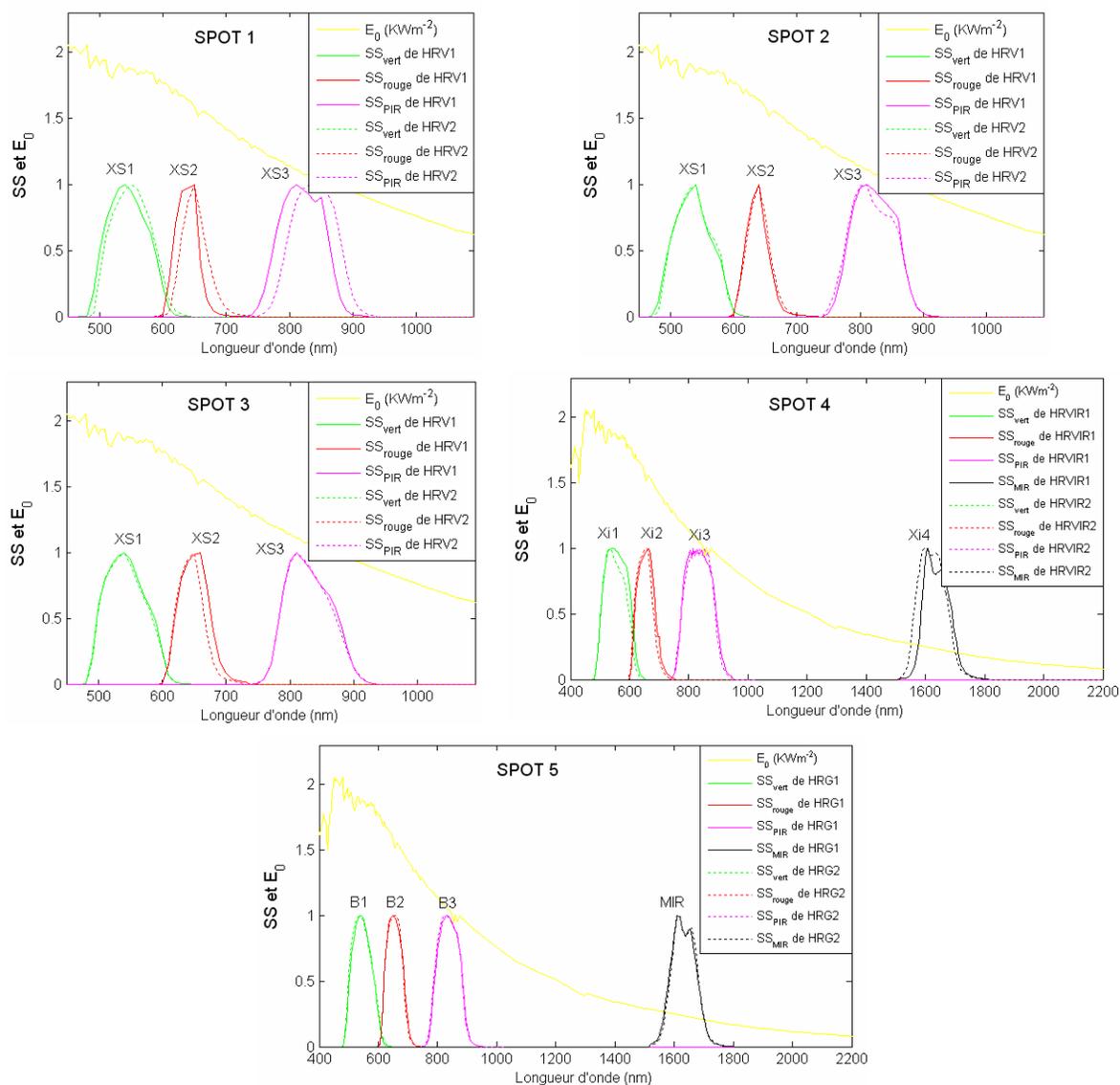


Figure A4.f. Sensibilités spectrales  $SS_k(\lambda)$  des instruments HR de la série SPOT 1, 2, 3, 4 et 5.

## A4-8. Le satellite Formosat-2

Lancé en mai 2004, le satellite Formosat-2 (de construction taïwanaise) introduit la génération annoncée des satellites français « Venüs » qui vont suivre la série SPOT. Les images Formosat-2 ont une résolution de 8m (2m en Panchromatique), 4 bandes spectrales : 488, 565, 650, 830 nm et offrent une revisite quotidienne (orbite à 891 km, cycle d'un jour). Les images sont commercialisées par SPOT Image avec un codage sur 8 bits et des gains programmables.

Les sensibilités spectrales du capteur Formosat-2 sont comparées à celle de HRG1 de SPOT sur la figure A4.g.

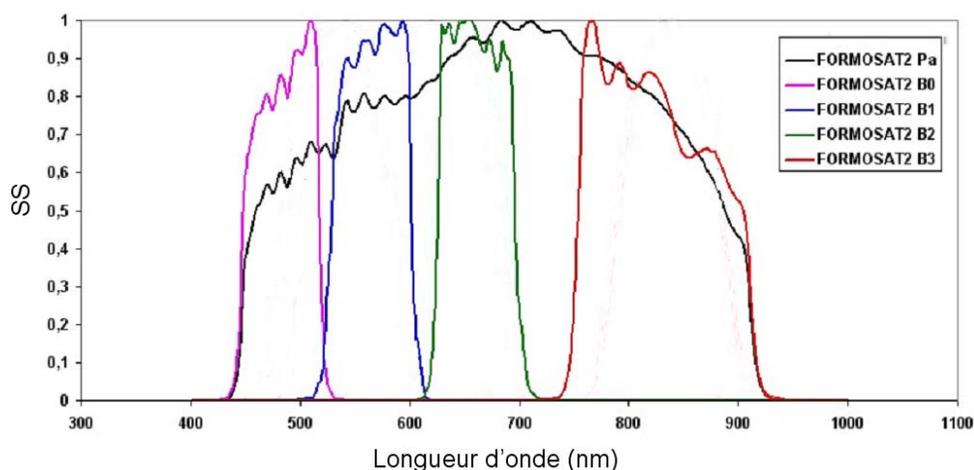


Figure A4.g. Sensibilités spectrales  $SS_k(\lambda)$  des bandes spectrales de Formosat-2, comparativement à celles du capteur HR de SPOT.

## Références

Fleming D., 2003, Ikonos DN value conversion to planetary reflectance, CRESS project, Geography Department, University of Maryland, version 2.1, February 14 2003.

Thenkabail P.S., E.A. Enclona, M.S. Ashton, C.L. Minko and J. De Dieu, 2004, Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests, Remote Sensing of Environment 90: 23–43.

Bryant R., M.S. Moran, S. McElroy, C. Holifield, K. Thome, T. Miura and S.F. Biggar, Data Continuity of Earth Observation (EO-1) Advanced Land Imager (ALI) and Landsat TM and ETM+. Technical Report.

Alistair M. and S. Smith, How to Convert ASTER Radiance Values to Reflectance. An Online Guide. (<http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984>).

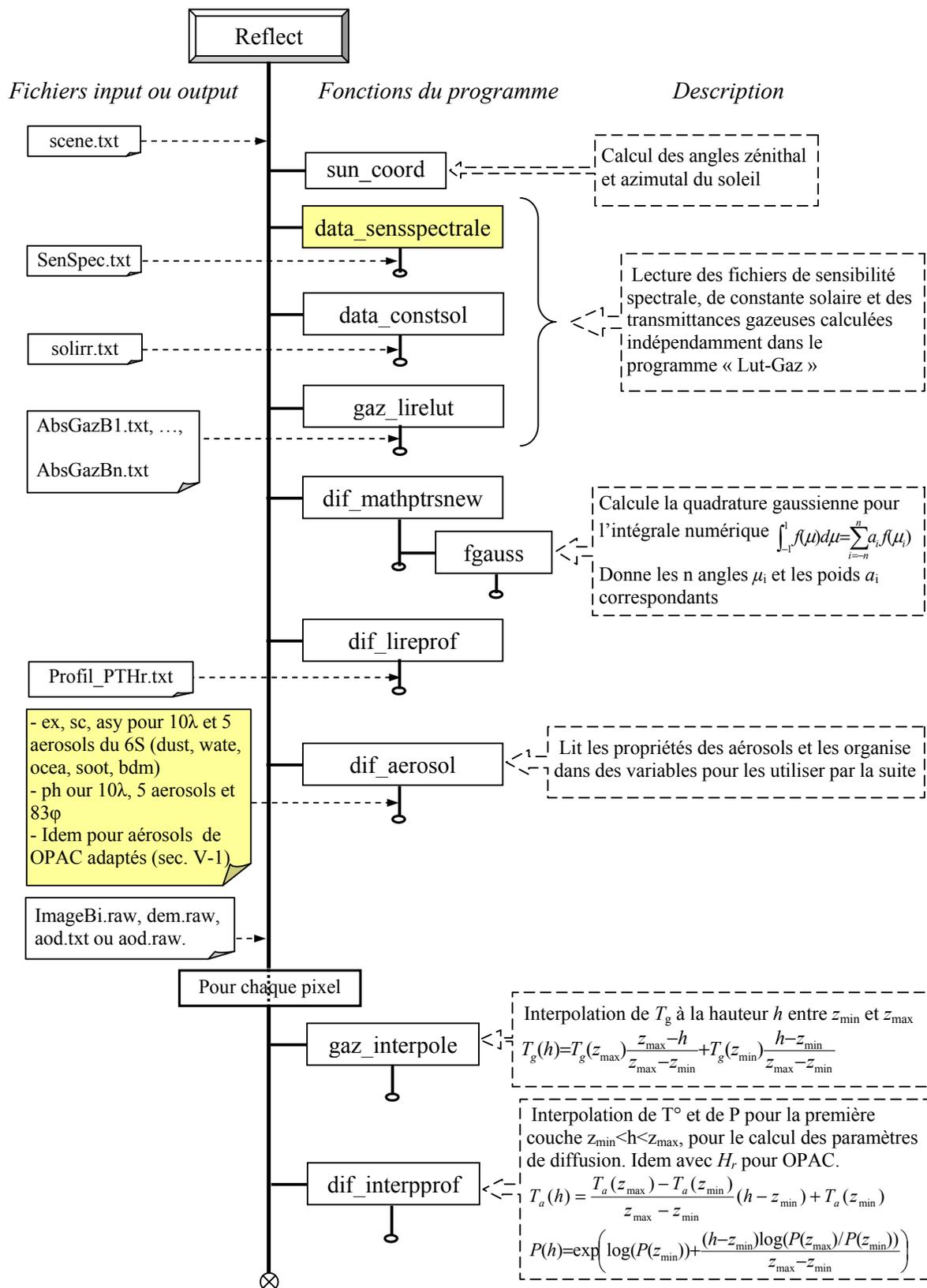
Landsat 7 Science Data Users Handbook, NASA, chapter 8. Radiometric Calibration ([http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook\\_htmls/chapter8/chapter8.html](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter8/chapter8.html))

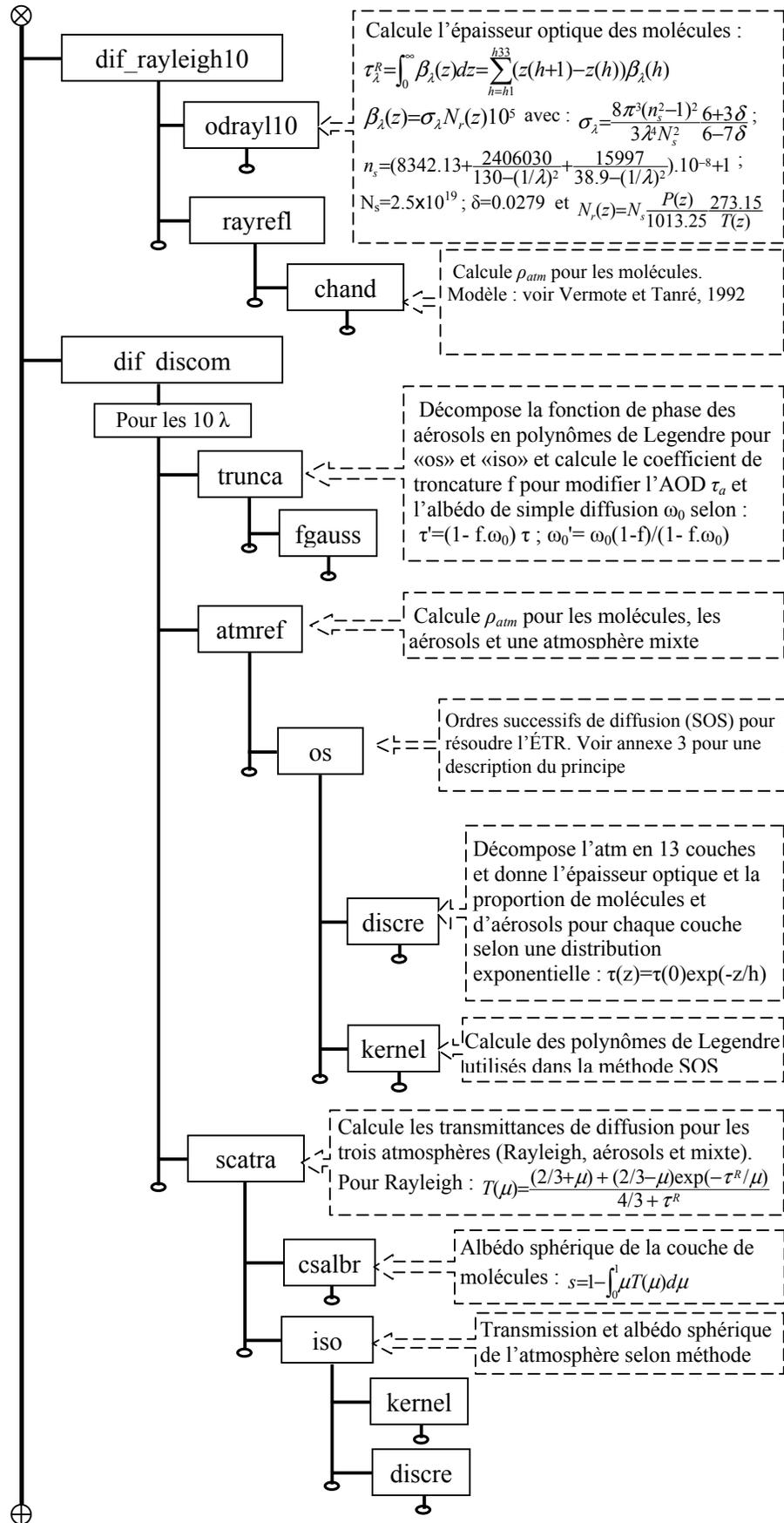
Krause K., 2003, Radiance Conversion of QuickBird Data, Technical Note, DigitalGlobe, 1900 Pike Road Longmont, Colorado, USA. (<http://www.pcigeomatics.com/discuss-archive/pdf00001.pdf>)

Les satellites SPOT. Les fiches techniques. (<http://www.spotimage.fr/web/148-les-satellites-spot.php>).

ASTER User's Guide Part I General (Ver.4.0) July, 2005 ERSDAC Earth Remote Sensing Data Analysis Center.

## ANNEXE 5 - Architecture de REFLECT autour des routines du code 6S





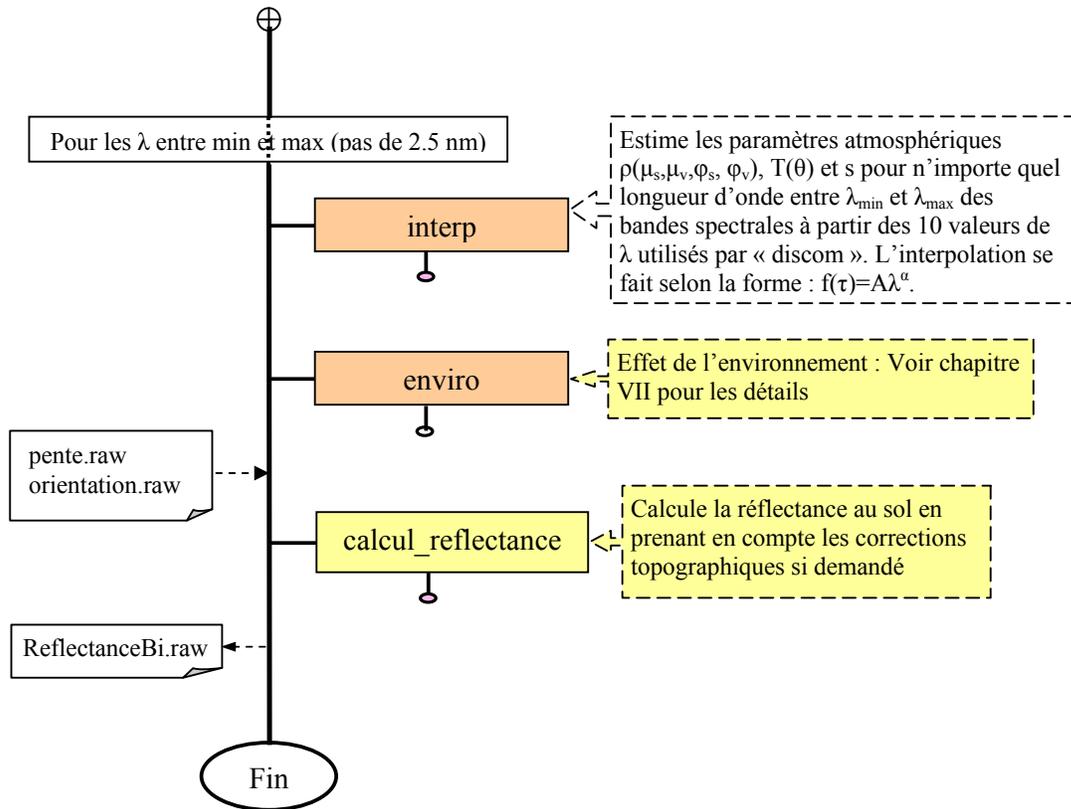


Figure A5.a. Architecture des routines de REFLECT autour de celles du code 6S. Les boîtes colorées indiquent les modèles modifiés dans le cadre de cette recherche.