N° d'ordre: 2703

THÈSE

présentée en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE III

Spécialité: Télédétection Spatiale de la Biosphère

par

Véronique PINEL

APPORT DE LA MODÉLISATION DU TRANSFERT RADIATIF POUR L'ÉTUDE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS PAR TÉLÉDÉTECTION

Soutenue le 19 Juin 1997 devant la commission d'examen composée de:

M. Raoul TALON	Professeur UPS, CESR, Toulouse	Président du Jury
M. Marcel RAFFY	Professeur ULP, GSTS, Strasbourg	Rapporteur
M. Serge RAMBAL	Directeur de Recherche CNRS, CEFE, Montpellier	Rapporteur
M. François BLASCO	Directeur de Recherche CNRS, LET, Toulouse	Examinateur
M. Michel DESHAYES	Ingénieur en chef, ENGREF, Montpellier	Examinateur
M. Marc LEROY	Ingénieur CNES, CESBIO, Toulouse	Examinateur
M. J.P. GASTELLU-ETCHEGORRY	Professeur UPS, CESBIO, Toulouse	Directeur de thèse

CESR
Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements
9 avenue du Colonel Roche
31028 Toulouse Cedex 4 - France

CESBIO
Centre d'Études Spatiales de la BIOsphère
18 avenue Édouard Belin
31401 Toulouse Cedex 4 - France

A mes parents et Jérôme,

A mon pépé,

A ma famille.

Remerciements

« Remercier » est un devoir en fin de thèse car sans le dévouement, la rigueur, les qualités scientifiques et l'aide morale de plusieurs personnes, je n'aurais pu mener à bout mes travaux de recherche. Je tiens donc à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin dans l'élaboration de cette thèse. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance, ma confiance et mon amitié.

Tout d'abord, les membres du jury:

Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry (directeur de thèse), sans qui, rien n'aurait été fait. Il est pour moi un exemple de rigueur scientifique et de disponibilité.

MM Marcel Raffy et Serge Rambal (rapporteurs) qui ont accepté de juger ces travaux de recherche. Leurs conseils et leurs critiques constructives m'ont été très utiles car d'une grande qualité.

MM François Blasco, Michel Deshayes, Marc Leroy et Raoul Talon (examinateurs) qui m'ont fait l'honneur de faire partie de mon jury de thèse et d'avoir consacré une partie de leur temps à examiner ce travail.

Je tiens à remercier les membres du CESR puis du CESBIO que j'ai côtoyés tous les jours:

MM Gilbert Vedrenne et Pierre Bauer respectivement directeurs du CESR et du CESBIO qui m'ont permis de travailler à chaque fois dans un environnement scientifique de qualité.

Que Marie-Claude Cathala, Monique Britz, Christine Faure et Jean-Pierre Champagnac soient ici remerciés pour m'avoir évité ce qu'il y a de pire dans la thèse, les « paperasses » administratives.

J'ai une pensée toute particulière pour «Jojo », l'animateur « musical » du bureau (Meuh! Meuh!, il comprendra). Merci pour m'avoir « supportée » dans tous les sens du terme.

Enfin, sans eux les jours seraient bien tristes! Alors merci aux copines: Valérie D., Florence R., Valérie T., Selma A., Sophie M., ... et aux copains: Olivier A., Simon B., Patrice B., Oscar C., Patrick E., Nicolas F., Roger F., Pierre-Louis F., Pierre G., Olivier H., Laurent K., Jean R., Franck S., Jean-Claude S., Laurent T., et tous les autres ...

Je tiens également à remercier certains scientifiques extérieurs au CESBIO:

Richard Joffre (CEFE, Montpellier) qui m'a aidée et conseillée dans le traitement des données spectrométriques, Donald Deering (NASA, Greenbelt, USA) pour ses discussions très pertinentes, MM Jean-Pierre Jessel, Mathias Paulin et Laurent Dadalto (IRIT, Toulouse) pour le projet VOXAR, Guy Cautenet (LAMP, Clermont-Ferrand) dont je me souviendrais toujours de son accueil très chaleureux en Auvergne et Thierry Fourty (INRA, Avignon) dont les discussions ont toujours été très profitables.

Pendant ma thèse, j'ai bénéficié d'un poste de moniteur et d'ATER. J'ai eu la chance de travailler avec des personnes compétentes qui m'ont aidée et conseillée dans mon travail. Je remercie donc vivement Guy Alcouffe, M. Gélard, Michel Brustet, Armand Lopes, Raoul Talon, Albert Beswick et Pierre Caffarelli.

Enfin, je pense tout particulièrement à mes amis rencontrés au DEA: Philippe Bonin qui me fait rougir aujourd'hui (je sure qu'il finira par trouver sa voie) et Patrick Martin exilé sous le soleil d'Honnolulu. Ils débordent tous deux de qualités et de générosité.

Et puis, la vie de thèse c'est aussi la vie de tous les jours, faites de haut et de bas, avec des gens plus que formidables qui ont su me donner gratuitement le meilleur d'eux-mêmes par leur soutien et leur courage tous ces jours de tempête. Ces gens là sont hors du temps et représentent pour moi ce que j'ai de plus cher au monde. Alors, merci encore à mes parents, à Jérôme, à toute ma famille et mille bisous à Aurélie et Fabien dont la photo qui n'a jamais quitté mon bureau a su mettre tous les jours de la bonne humeur dans mon coeur.

Apport de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des écosystèmes forestiers par télédétection

Résumé : L'étude de la Biosphère Continentale à partir de données de télédétection visible et infrarouge nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques à l'origine de l'information radiométrique mesurée depuis l'espace. Les modèles de transfert radiatif appliqués aux surfaces terrestres jouent un rôle majeur pour développer notre connaissance.

Cette thèse est centrée sur la modélisation 3-D des couverts forestiers et présente le modèle de transfert radiatif DART qui pallie à plusieurs limitations classiques des modèles actuels: introduction des mécanismes physiques majeurs (atmosphère anisotrope, rétrodiffusion, relief, etc.), prise en compte de la nature 3-D de la végétation, simulation d'images. L'apport du modèle DART a été étudié dans 3 domaines particuliers:

(1) l'analyse texturale des images satellitaires : L'intérêt du modèle DART réside dans sa capacité à fournir des simulations précises. Ainsi, l'utilisation de modèles simples peut conduire à une information texturale erronée. Le potentiel de DART a été illustré en étudiant la sensibilité de l'information texturale à certains paramètres biophysiques (taux de couvert, LAI, etc.) et expérimentaux (configurations d'éclairement et d'observation, résolution spatiale). Finalement, une validation partielle a été réalisée avec des images à haute résolution spatiale du capteur aéroporté RAMI acquises sur le site des Landes.

(2) l'analyse spectrométrique : Un intérêt de la haute résolution spectrale est d'évaluer le contenu des couverts en éléments biochimiques. Cette connaissance est essentielle pour étudier le fonctionnement de la végétation. Les travaux empiriques menés à ce jour n'ont pas permis d'établir de relations robustes indépendantes du site d'étude et des conditions d'acquisition des données de télédétection. Ce problème est apparu avec l'analyse des données du spectromètre aéroporté ISM pour établir des relations prédictives des concentrations en lignine, cellulose et azote d'un site de la forêt des Landes. Ces relations diffèrent des relations obtenues lors d'une expérience précédente (AVIRIS). Le modèle DART a permis d'étudier la validité de ces relations compte tenu de la configuration d'acquisition et de la variabilité naturelle du couvert (LAI, taux de couvert, sous bois).

et, (3) l'analyse de données « multi-résolution » : Une étude prospective à été menée pour montrer que la modélisation physique peut contribuer à l'étude d'un problème à la fois commun et fondamental en télédétection: la signification de l'information satellitaire à différentes résolutions spatiales. L'objectif est de simuler de manière précise la BRDF de couverts étendus en utilisant uniquement des paramètres biophysiques et optiques mesurés sur le terrain. L'approche retenue consiste en un couplage de 2 modèles de transfert radiatif fonctionnant à différentes échelles d'analyse.

Mots Clés : télédétection, couvert forestier, transfert radiatif, fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (BRDF), texture, variogramme, haute résolution spectrale (HRS) et spatialisation de l'information.

Contribution of the DART radiative transfer model to study forest ecosystems from remote sensing data

Abstract : The study of the Continental Biosphere with visible and infrared remote sensing data requires a good knowledge of radiative mechanisms to understand the radiometric information measured from sensor. In this context, radiative transfer models are key tools.

This thesis presents a new radiative transfer model named DART. It takes into account (1) major physical mechanisms (multiple scattering, anisotropic atmosphere, hot-spot, topography, etc.), (2) the heterogeneous structure of the canopy and (3) simulates images. The contribution of the DART model to forest ecosystems was analysed in three domains

(1) textural analysis of remote sensing images : The interest of the DART model is due to its ability to simulate accurate reflectance images. Indeed, unaccurate models can lead to erroneous textural information. Here, the potential of the DART model was showed with the analysis of the textural information sensitivity to biophysic parameters such as cover rate, LAI, etc. and to experimental parameters such as illumination and viewing configurations and spatial resolution. Finally, a partial validation with high spatial resolution images of the airborne RAMI sensor (SPOT Simulator) was made with data acquired on a forest site of the Landes (France).

(2) high spectral resolution data analysis : The capability of the DART model to produce accurate canopy reflectance simulations was used to investigate the robustness of relationships relating high spectrometric data to canopy chemical element such as lignin, cellulose and nitrogen. More specifically, the sensitivity of these relationships to canopy structure and acquisition parameters was studied. This analysis is very important because predictive relationships obtained from an empirical study with airborne spectrometric ISM data acquired on the Landes forest, showed that these relations are very different with these obtained two years before on the same test site with AVIRIS data.

and, (3) multi spatial resolution data analysis : Radiative modeling can also contribute to the analysis of a common and fundamental problem in remote sensing : the meaning of the remote sensing information at different spatial resolutions. The objective is to model accurate large canopy BRF (Bidirectional Reflectance Factor) from only biophysical and optic parameters measured on the site. The approach consists in the coupling of two radiative transfer models functionning at different scales of analysis. The preliminary results are very encouraging.

Keywords : remote sensing, canopy, radiative transfer, bidirectional reflectance distribution function (BRDF), textural information, variogram, high spectral resolution and multi spatial resolution.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

SOMMAIRE 1
LISTE DES FIGURES 9
LISTE DES TABLEAUX 21
ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS 29

INTRODUCTION GENERALE 33

Contexte de la thèse 35
Objectif de la thèse 35
Plan de la thèse 36

CHAPITRE I^{ER} : MODELISATION PHYSIQUE
- APPLICATION AUX SYSTEMES FORESTIERS - 37

I. INTRODUCTION 39
II. LES MODELES DE REFLECTANCE 39
II.1. Modèles analytiques 41
II.2. Modèles turbides 42
II.2.1. Les modèles basés sur l'approximation de Kubelka et Munk 42
II.2.2. Modèles basés sur l'utilisation directe de l'équation du transfert radiatif avec des méthodes intégrales itératives 44
II.2.3. Modèles basés sur la discrétisation de l'espace des directions de propagation avec la méthode des ordonnées discrètes 45
II.3. Modèles géométriques 47
II.4. Modèles discrets ou de suivi de rayons 51
II.4.1. Les modèles «discret» 53
II.4.2. Modèles de «suivi de rayons» combiné à la méthode de Monté-Carlo 57
II.5. Modèles basés sur la radiosité 58
II.5.2.1. Radiosité classique 58
II.5.2.2. Radiosité progressive 61
III. CONCLUSION DU CHAPITRE I^{er} 62

CHAPITRE 2: LE MODELE DART 63

I. THEORIE DU MODELEDART 65
I.1. Approche du modèle DART 65
I.1.1. Discrétisation de l'espace 65
I.1.2. Type des cellules 65
I.1.3. Simulation d'un paysage infini 66
I.1.4. Discrétisation des directions de propagation du rayonnement 67
I.2. Élaboration de scènes complexes 68
I.3. Équation du transfert radiatif 72
I.4. Rayonnements incidents 73
I.5. Approche itérative du modèle DART 74

I.6. Facteur de réflectance bidirectionnelle 75
I.7. Mécanismes d'interactions 76
I.7.1. Mécanismes d'interactions associés aux cellules d'éléments foliaires 77
I.7.1.1 Fonction de transmission 77
I.7.1.2. Fonction de diffusion 77
• Diffusion lambertienne des feuilles 80
• Réflection spéculaire des éléments foliaires - Polarisation 80
I.7.1.3. Diffusion d'ordre 1 dans la cellule 82
I.7.1.4. Diffusion multiple dans la cellule 83
I.7.1.5. Simulation de la rétrodiffusion ou «hot-spot» 85
I.7.1.6. Itérations d'ordre 1 et multiple 85
• Première itération 86
• Itérations > 1 87
I.7.2. Mécanismes d'interactions associés aux cellules non foliaires 89
I.7.2.1. Cellules de type «Sol» 89
• Fonctions de transfert des cellules de type «sol» 89
• Équations de transfert des cellules de type «sol» 93
I.7.2.2. Cellules de type «Tronc» 94
• Fonctions de transfert des cellules de type «tronc» 94
• Équations de transfert des cellules de type «tronc» 95
II. RÉSULTATS ET ANALYSES DE SIMULATIONS DART 96
II.1. Études préliminaires 96
II.1.1. Influence de la dimension des cellules élémentaires 96
II.1.2. Influence du nombre d'itérations 97
II.1.3. Influence du seuil T_2 100
II.2. Simulations DART d'une parcelle forestière et analyses 101
II.3. Simulation d'images au niveau du capteur: Couplage DART/6S 107
III. CONCLUSION DU CHAPITRE 2 113

CHAPITRE 3: MODÉLISATION ET TEXTURE D'UN COUVERT FORESTIER 115

I. INTRODUCTION 117
II. SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION 118
II.1. Description du site d'étude: Forêt de Nézer, Les Landes, France 118
II.2. Données aéroportées «RAMI» 120
II.3. Méthodologie de correction des données RAMI 121
II.3.1. Problème d'étalonnage des données RAMI 121
II.3.2. Simulations DART de parcelles forestières du site d'étude et analyses 123
II.3.2.1. Configuration angulaire solaire pour les simulations DART 123
II.3.2.2. Simulations DART et analyses 123
II.3.3. Étalonnage des données RAMI 126
III. DÉFINITION ET QUANTIFICATION DE LA TEXTURE 127
III.1. Définition de la texture 127
II.2. Quantification de la texture à l'aide de variogrammes 128
III.2.1. Définition du variogramme 128

III.2.2. Évaluation pratique des variogrammes 130
III.2.3. Paramétrisation des variogrammes 131
III.2.4. Cas d'étude utilisant les variogrammes 132
III.2.5. Variogramme, fonction d'autocorrélation et transformée de Fourier 132
III. INFLUENCE THÉORIQUE DE PARAMÈTRES STRUCTURAUX DES PLANTATIONS FORESTIÈRES SUR LA SIGNATURE TEXTURALE 133
IV. INFLUENCE DES PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES- APPROCHE DART- 136
IV.1. Influence de la précision du modèle de transfert radiatif 137
IV.2. Influence de l'ordre de diffusion 140
IV.2.1. Simulations dans le visible 140
IV.2.2. Simulations dans le proche infrarouge 141
IV.3. Influence du taux de couverture 141
IV.3.1. Espacement entre les rangées d'arbres 141
IV.3.1.1. Parcelles à indice foliaire constant 142
IV.3.1.2. Parcelles à densité volumique foliaire constante 142
IV.3.2. Diamètre des couronnes 145
IV.3.2.1. Simulations dans le visible 145
IV.3.2.2. Simulations dans le proche infrarouge 149
IV.4. Influence de la position des arbres 150
IV.5. Influence de la hauteur des arbres 152
IV.6. Influence de la variation simultanée de plusieurs paramètres structuraux 154
IV.7. Influence de l'indice foliaire 155
IV.7.1. Simulations dans le visible 156
IV.7.2. Simulations dans le proche infrarouge 161
V. INFLUENCE DES CONFIGURATIONS ANGULAIRES 164
V.1. Influence de l'angle azimutal solaire 164
V.2. Influence de l'angle zénithal de visée 166
VI. INFLUENCE DE LA RÉSOLUTION SPATIALE 167
VI.1. Simulations dans le visible 168
VI.2. Simulations dans le proche infrarouge 171
VII. ÉTUDE DES VARIOGRAMMES RAMI 175
VII.1. Variogrammes RAMI dans le visible (vert) 175
VII.2. Variogrammes RAMI dans le proche infrarouge 179
VIII. CONCLUSION DU CHAPITRE 3 183

CHAPITRE 4: APPORTS POTENTIELS DE LA HAUTE RESOLUTION SPECTRALE POUR LES ETUDES FORESTIERES 185

I. INTRODUCTION 187
II. APPROCHE EXPÉRIMENTALE 189
II.1. Données expérimentales 189
II.1.1. Zone d'étude 189
II.1.2. Mesures spectrométriques aéroportées 189
II.1.2.1. Acquisitions des données 189
II.1.2.2. Corrections radiométriques 190
II.1.2.3. Corrections géométriques 191
II.1.2.4. Corrections atmosphériques 191
II.1.3. Échantillonnage 193

II.1.4. Analyses de laboratoire 193
II.1.4.1. Analyses chimiques 193
II.1.4.2. Mesures spectrales 195
II.2. Équations prédictives établies en laboratoire 196
II.2.1. Équations prédictives établies avec le Technicon InfraAlyser 450 196
II.2.2. Équations prédictives établies avec le NIR 6500 198
II.3. Validation des équations prédictives avec les mesures aéroportées 202
II.3.1. Extrapolation aux mesures AVIRIS 202
II.3.2. Extrapolation aux données ISM 203
II.4. Analyse des résultats et conclusion partielle 204
III. APPROCHE MODÉLISATION POUR L'ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LA HAUTE RÉSOLUTION SPECTRALE 206
III.1. Simulations DART d'une maquette de référence 206
III.1.1. Architecture de la maquette 206
III.1.2. Détermination des propriétés optiques $\omega_f \equiv (\rho_f, \tau_f)$ foliaires et ρ_{sb} du sol ou du sous-bois 207
III.1.3. Simulations DART de la réflectance du couvert 209
III.2. Établissement des équations prédictives 211
III.2.1. Observation au nadir 213
III.2.2. Observation en visée oblique 220
III.3. Étude de la variation structurale de la canopée 222
III.3.1. Influence de l'indice foliaire 222
III.3.2. Influence du taux de couverture 225
III.4. Conclusion partielle 228
IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 4 228

CHAPITRE 5: VERS UNE MODELISATION « MULTI-ECHELLE » 231

I. INTRODUCTION 233
Contexte général et position du problème 233
Méthodologie de l'approche retenue 233
II. SIMULATIONS «MULTI-ECHELLE» DU SOUS-BOIS 234
II.1. Influence de la discrétisation du sous-bois 234
II.2. Étape 1: Fonction de phase du sous-bois $T_{SB}(\Omega_s,\Omega_v)$ 236
II.3. Étape 2: Utilisation de la fonction de phase $T_{SB}(\Omega_s,\Omega_v)$ 237
II.4. Validation 237
III. SIMULATIONS «MULTI-ÉCHELLE» DES HOUPPIERS 241
III.1. Présentation du problème 241
III.2. Étape 1: Fonctions de transmittance $T_{Houp}(\Omega_s)$ et de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$ de houppier 241
III.2.1. Fonction de transmittance $T_{Houp}(\Omega_s)$ 242
III.2.2. Fonction de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$ 242
III.3. Étape 2: Calcul «multi-échelle» de BRDF de scènes 245
III.3.1. Méthode de calcul des flux transmis par une cellule «houppier» 246
III.3.2. Phase d'illumination solaire et rayonnement intercepté 248
III.3.3. Méthode de calcul des flux diffusé par une cellule «houppier» 249

IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 5 250

CONCLUSION GENERALE 251

CONCLUSION GENERALE 253

ANNEXES 255
Annexe 1: Images Push-Broom RAMI 255
Annexe 2: Le modèle PROSPECT 265
BIBLIOGRAPHIE 267
LISTE DES PUBLICATIONS 277

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1ER: MODÉLISATION PHYSIQUE - APPLICATION AUX SYSTÈMES FORESTIERS

Figure 1-1: Géométrie de l'ensemble «source, cible visée et récepteur».
Figure 1-2: Illumination d'un cône avec le modèle de Li et Stralher (1985). Vue de côté (a) et de dessus (b).
Figure 1-3: Représentation d'un conifère avec le modèle de Kanevski et Ross (1983)
Figure 1-4: Représentation de la scène (matrice 3-D de cellules élémentaires) et des sources d'illumination atmosphérique et solaire avec le modèle de Kimes et Kirchner (1982a).
Figure 1-5: Organigramme de la méthode de la radiosité.

CHAPITRE 2: LE MODÈLE DART

Figure 2-1: Représentation de la matrice 3-D de cellules élémentaires avec le modèle DART.
Figure 2-2 : Exemple d'un angle solide $\Delta\Omega_n$ et de sa direction centrale d'angles zénithal θ_n et azimutal ϕ_n.
Figure 2-3: Schématisation de la traversée d'un rayon dans une matrice de dimension 2x2x2. Les surfaces grisées correspondent aux faces des cellules traversées. Le rayon traverse les cellules (1 1 1), (1 1 2), (2 1 2) et (2 2 2).
Figure 2-4: Représentation schématique des éléments simulés par le programme de création des maquettes. Les arbres peuvent être distribués de manière aléatoire, en rangées ou en bosquets.
Figure 2-5: Exemple de profils vertical (a) et horizontal (b) d'une maquette. Le profil vertical (a) est repéré sur (b) par un trait pointillé.
Figure 2-6: Représentation d'une scène DART - Phase d'illumination.
Figure 2-7: Algorithme du modèle DART.
Figure 2-8: Représentation schématique de l'interaction du rayonnement avec une feuille de dicotylédone.
Figure 2-9: Mécanismes de diffusions simples et multiples à l'intérieur d'une cellule d'éléments foliaires avec le modèle DART.
Figure 2-10: Influence des paramètres (a) h, (b) ω, (c) B_o et (d) des coefficients b_1, c_1, b_2, et c_2 sur la réflectance dans le cas d'une fonction de phase de Pinty et al. (1989). Les simulations ont été effectuées dans le plan principal pour une configuration de base telle que θ_s=60°, ω=0.25, B_o=1, h=0.0025, b_1=c_1=1 et b_2=c_2=0.
Figure 2-11: Influence de la dimension des cellules sur la réflection d'une plantation régulière de taux de couverture: a) 34% et b) 53%, dans le a) vert et le b) proche infrarouge et pour une configuration angulaire de visée a) à la verticale et pour b) θ_v = 37.21° et ϕ_v = 340°. Dans le cas où le taux de couverture n'a pu être suffisamment approché, deux simulations ont été effectuées pour des taux de couverture encadrant le taux désiré.

Figure 2-12: Évolution de la réflectance avec les itérations successives dans le cas d'une plantation éclairée par du rayonnement solaire et atmosphérique. La valeur obtenue avec la méthode d'extrapolation exponentielle est indiquée en traits pointillés. Simulations dans (a) le vert et (b) le proche infrarouge.
Figure 2-13: Influence du seuil d'arrêt des flux diffus. Erreur relative maximale sur la réflectance d'une plantation forestière simulée dans (a) le vert et (b) le proche infrarouge.
Figure 2-14: Système de coordonnées des directions d'incidence Ω_s et de visée Ω_v pour la représentation des réflectances bidirectionnelles. Les distances à l'origine indiquent θ (angle off-nadir).
Figure 2-15: BRDF d'une parcelle forestière simulée avec le modèle DART dans le domaine spectral du vert.
Figure 2-16: Profil de réflectance d'une parcelle forestière simulée avec le modèle DART dans le domaine spectral du vert et dans le plan azimutal 222°.
Figure 2-17: Simulations DART d'une parcelle forestière de pins dans le domaine spectral du vert pour différentes configurations d'observation (a,b) nadir, (c,d) $\theta_v = 31.2°$ et $\phi_v = 200°$, (e,f) $\theta_v = 48°$ et $\phi_v = 200°$ et (g,h) configuration de la rétrodiffusion $\theta_v = 31.2°$ et $\phi_v = 222°$. Les images (d,f,h) ont été corrigées géométriquement. La configuration d'illumination est $\theta_s = 148.8°$ et $\phi_s = 42°$ pour le soleil et SKYL= 25% excepté pour la simulation (b) où SKYL= 100%.
Figure 2-18: Simulations DART d'une même parcelle forestière pour différentes configurations d'observation (même angle zénithal 31.2° et différents angles azimutaux) dans le domaine spectral du vert et pour une illumination solaire. Les images ont été corrigées géométriquement.
Figure 2-19: Transmission atmosphérique dans le visible et le proche infrarouge.
Figure 2-20: Influence de la visibilité atmosphérique sur les images de simulation. La visibilité est (a)infinie ou égale à (b)20 km, (c) 15 km, (d) 10 km et (e) 5 km.
Figure 2-21: Histogrammes des images résultant du couplage DART / 6S pour des 5 visibilités atmosphériques.

CHAPITRE 3: MODÉLISATION ET TEXTURE D'UN COUVERT FORESTIER

Figure 3-1: Parcellaire du site de Nézer. Les zones grisées correspondent aux parcelles où l'indice foliaire a été mesuré. Les flèches représentent les 4 axes de vol du radiomètre aéroporté «RAMI », le 7 Mai 1993.
Figure 3-2: Relation empirique d'ordre 3 entre le LAI et l'âge des pins maritimes des parcelles.
Figure 3-3: Éclairement solaire du 7 Mai 1993 (μ_s = 0.853). Les courbes indiquent l'éclairement au sommet de l'atmosphère et au niveau de la surface terrestre. Les principaux gaz absorbants sont indiqués.
Figure 3-4: Réflectances bidirectionnelles spectrales de chemins, routes, sol sablonneux, tronc de pins et sous-bois mesurées avec un spectromètre de terrain GER opérant entre 400 et 2500nm (GER, Note technique).
Figure 3-5: Angle azimutal solaire $\phi_{sun\ DART}$ dans le repère du modèle DART.

Figure 3-6: Simulations DART au nadir dans le domaine spectral du proche infrarouge de 4 parcelles (a) P770 : 12 ans, (b) P650 : 13 ans, (c) P1261 : 20 ans et (d) P191 : 40 ans.
Figure 3-7: Réflectances moyennes DART (%) dans le vert (a), rouge (b) et proche infrarouge (c) et NDVI (d) de parcelles de pins en fonction de l'indice foliaire.
Figure 3-8: Régressions entre les moyennes des comptes numériques RAMI des parcelles de pins et leurs réflectances moyennes simulées avec le modèle DART dans les domaines spectraux du vert (a), rouge (b) et proche infrarouge (c).
Figure 3-9: Exemples de variogrammes en fonction de différents types de couverts: (a) homogène, (b) périodique, et (c) aléatoire au delà d'une distance a.
Figure 3-10: Exemple de calcul d'un variogramme directionnel. Les distances entre les pixels voisins « 1 2 », « 2 3 » et « 3 4 », etc. ne sont pas égales si θ est différent de $k.\frac{\pi}{4}$, où k est un nombre entier.
Figure 3-11: Ajustement d'un variogramme de couvert périodique par un modèle exponentiel et un modèle sphérique.
Figure 3-12: Spectre en puissance de la transformée de Fourier d'une image périodique de bandes blanches et noires. La période est égale à 25 pixels. La transformée de Fourier inverse de ce spectre est la fonction d'autocorrélation.
Figure 3-13: Profil radiométrique normal aux rangées d'arbres d'une plantation forestière simulée (trait plein). La courbe en trait pointillé représente le profil schématique [0 175].
Figure 3-14: Variabilité des variogrammes selon divers paramètres structuraux d'une plantation forestière périodique schématique infinie : (a) Amplitude (b-a) des créneaux. T = 25 pixels, T_1 = 5 pixels et (b-a) varie de 150 à 255. La courbe en trait pointillé représente le variogramme d'une image 250x250 (N = 10). (b) Largeur T_1 du créneau. (b-a) = 250 et T = 20 pixels. (c) Variabilité de l'amplitude: $b \in [b-\Delta\ b+\Delta]$ et $a \in [a-\Delta\ a+\Delta]$, avec a = 80 et b = 180. T = 20 pixels et T_1 = 5 pixels.
Figure 3-15: Réflectance et transmittance hémisphériques d'aiguilles de pins maritimes mesurées en laboratoire avec le spectromètre EOTECH (Manuel d'instruction).
Figure 3-16: Image DART d'une plantation forestière simulée avec a) 255 et b) 4 niveaux de gris.
Figure 3-17: Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART réalisées avec 255 ou 4 niveaux de gris. Les modèles exponentiels associés sont représentés.
Figure 3-18: Variogrammes de simulations DART dans le visible pour 3 itérations. Les modèles exponentiels associés sont représentés. SKYI= 0%.
Figure 3-19: Variogrammes de simulations DART dans le visible pour 3 itérations. Les modèles exponentiels sont représentés. SKYI= 25%.
Figure 3-20: Variogrammes de simulations DART dans le proche infrarouge pour 4 itérations. Les modèles exponentiels sont représentés.
Figure 3-21: Simulations DART dans le visible d'une plantation de pins pour des espacements entre les rangées d'arbres égaux à a) 4.5 m, b) 5.5 m, c) 6.5 m et d) 7.5 m.
Figure 3-22: Profils horizontaux radiométriques (CN) moyens d'images DART. La scène comprend des rangées d'arbres espacées de 5.5 m (—), 6.5 m (- -) et 7.5 m (— —). La réflectance est donnée par R= 0.065.CN/255.

Figure 3-23: Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART de plantations de pins à indice foliaire constant (LAI = 2.92) pour Δ = 4.5 m, 5.5 m, 6.5 m et 7.5 m.
Figure 3-24: Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART de plantations à densité foliaire constante (u_f = 0.35) pour Δ = 4.5 m, 5.5 m, 6.5 m et 7.5 m.
Figure 3-25: Simulations DART de plantations de pins (LAI = 2.92). Les diamètres des couronnes sont égaux à a) 1.5m, b) 2.5 m, c) 3.5 m et d) 4.5 m.
Figure 3-26: Influence du diamètre des couronnes des arbres. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le visible. Simulations de parcelles de pins à indice foliaire constant (LAI = 2.92 ; μ varie de 0.36 m^{-1} à 3.45 m^{-1}).
Figure 3-27: Influence du diamètre des couronnes des arbres. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le visible. Simulations de parcelles de pins à densité foliaire constante (μ = 0.36 m^{-1}; LAI varie de 0.31 à 2.92).
Figure 3-28: Relation entre le diamètre des couronnes et les portées des variogrammes a) verticaux et b) horizontaux. Les points de mesures correspondent aux simulations DART dans le visible pour une plantation forestière à indice foliaire ou densité foliaire constant.
Figure 3-29: Réflectances (R) moyennes (%) du sol éclairé, sol à l'ombre et houppier des parcelles simulées pour différents diamètres de couronnes (1.5 à 4.5 m) et LAI constant. L'écart R_{sol} - $R_{houppier}$ diminue avec l'accroissement du diamètre.
Figure 3-30: Simulations DART de plantations de pins pour des diamètres de couronnes égaux à a) 1.5 m, b) 2.5 m, c) 3.5m et d) 4.5 m. LAI = 2.92.
Figure 3-31: Influence du diamètre des couronnes des arbres. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le PIR. (LAI = 2.92).
Figure 3-32: Simulations DART d'une plantation de pins: positions des arbres dans un rayon de a) 0.0 m, b) 0.5 m, c) 1.0 m et d) 1.5 m autour de la position initiale.
Figure 3-33: Influence de la position des arbres dans les rangées. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le visible. L'écart entre rangées est de 4.5 m.
Figure 3-34: Simulations DART de plantations de pins de hauteur égale à a) 12 m, b) 13 m, c) 14 m et d) 15 m.
Figure 3-35: Influence de la hauteur des arbres. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART. (LAI = 2.92).
Figure 3-36: Simulations DART de plantations de pins. Écart-type du diamètre et de la hauteur des couronnes: a) 0.0 m, b) 1.0 m, c) 1.5 m et d) 2.0 m. Les écart-types 1.5 m et 2 m sont irréalistes: ils impliquent des formes de houppiers inexistantes sur notre site.
Figure 3-37: Influence de la variation simultanée de paramètres structuraux (∅ des couronnes, H des arbres). Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART.
Figure 3-38: Évaluation du taux de couverture d'une a) image DART d'une plantation forestière de LAI = 10. b) Histogramme de l'image (SKYL = 0%).
Figure 3-39: Influence du LAI d'une parcelle de pins. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART. (SKYL = 0%).
Figure 3-40: Influence du LAI d'une parcelle de pins. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART. (SKYL = 25%).

Figure 3-41: Influence du LAI d'une parcelle de pins. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART. (SKYL= 50%).
Figure 3-42: Simulation d'une « forêt naturelle » de LAI égale à 4 dans le domaine spectral du vert.
Figure 3-43: Variabilité des variogrammes d'images DART d'une forêt naturelle de LAI variable. La position des arbres n'est pas régulière (Écart max. de 10 m).
Figure 3-44: Paliers des variogrammes pour différents LAI et SKYL.
Figure 3-45: Relation entre la portée ($1/V_1$) dérivée des variogrammes horizontaux et le LAI. Simulations dans le proche infrarouge avec un SKYL de 0 et 25%.
Figure 3-46: Paliers des variogrammes pour différents LAI et SKYL.
Figure 3-47: Influence du LAI d'une parcelle de pins dans le proche infrarouge. Variogrammes a)verticaux et b)horizontaux d'images DART. (SKYL= 0%).
Figure 3-48: Simulations DART d'une plantation de pins (LAI = 2.92) pour 3 directions d'éclairement: $\theta_s = 148.8°$; (a) $\phi_s = 90°$ (b) $\phi_s = 45°$ et (c) $\phi_s = 0°$.
Figure 3-49: Influence de la configuration d'illumination : $\theta_s = 148.8°$; $\phi_s = 90°$, 45° et 0°. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART.
Figure 3-50: Simulations DART d'une parcelle de pins pour (a) $\theta_v = 0°$, (b) $\theta_v = 14.4°$, (c) $\theta_v = 31.2°$, (d) $\theta_v = 48.0°$, (e) $\theta_v = 64.8°$ avec $\phi_v = 230°$. Les images ont été corrigées géométriquement.
Figure 3-51: Influence de la configuration géométrique d'observation ($\theta_v = 0°$, $\theta_v = 14.4°$, $\theta_v = 31.2°$, $\theta_v = 48.0°$ et $\theta_v = 64.8°$ avec $\phi_v = 230°$) d'une parcelle (LAI = 2.92). Variogrammes d'images DART de direction parallèle aux rangées verticales d'arbres.
Figure 3-52: Simulations DART d'une plantation forestière pour plusieurs résolutions spatiales: (a) 50 cm, (b) 1 m, (c) 1.5 m, (d) 2 m, (e) 2.5 m et (f) 3 m. Les simulations (b), (c), (d), (e), et (f) ont été obtenues par moyennage de la simulation (a).
Figure 3-53: Simulations DART de résolution 1.5 m obtenues avec (a) une maquette de 1.5 m de résolution et (b) par moyennage d'une simulation de résolution 0.5 m (Fig. 3-52a).
Figure 3-54: Influence de la résolution spatiale dans le visible. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART d'une plantation pour diverses résolutions spatiales (50 cm, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m et 3 m). Les courbes en trait plein se rapportent aux images obtenues par moyennage de la simulation pleine résolution (50 cm) alors que les courbes en trait pointillé correspondent aux simulations pleine résolution.
Figure 3-55: Relations entre la portée calculée à partir des variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART d'une plantation forestière pour plusieurs résolutions spatiales.
Figure 3-56: Simulations DART dans le domaine spectral du proche infrarouge d'une plantation forestière pour plusieurs résolutions spatiales: (a) 50 cm, (b) 1 m, (c) 1.5 m, (d) 2 m, (e) 2.5 m et (f) 3 m. Les simulations (b), (c), (d), (e), et (f) ont été obtenues par moyennage de la simulation (a).
Figure 3-57: Simulations DART de résolution 1.5 m obtenues avec (a) une maquette de 1.5 m de résolution et (b) par moyennage d'une simulation de résolution 0.5 m (Fig. 3-56a).
Figure 3-58: Influence de la résolution spatiale dans le proche infrarouge. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART d'une plantation pour

diverses résolutions spatiales (50 cm, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m et 3 m). Les courbes en trait plein se rapportent aux images obtenues par moyennage de la simulation pleine résolution (50 cm) alors que les courbes en trait pointillé correspondent aux simulations pleine résolution.

Figure 3-59: Variogrammes RAMI dans le domaine spectral du visible (vert) pour différentes parcelles de pins ; axe de vol a) N°1, b) N°2, c) N°3 et d) N°4.

Figure 3-60: Images RAMI (axe de vol N°4) de la parcelle P251 acquises dans les bandes spectrales du a) vert et du b) proche infrarouge.

Figure 3-61: Relation entre l'âge des pins et les portées des variogrammes calculés sur les images RAMI de plantations forestières dans le domaine spectral du proche infrarouge.

Figure 3-62: Variogrammes RAMI dans le domaine spectral du proche infrarouge pour différentes parcelles de pins ; axe de vol a) N°1, b) N°2, c) N°3 et d) N°4.

CHAPITRE 4: APPORTS POTENTIELS DE LA HAUTE RÉSOLUTION SPECTRALE POUR LES ÉTUDES FORESTIÈRES

Figure 4-1: Spectres ISM de 3 types de paysage: sable (--), forêt de pins (—) et lac (—+—) ; canaux (a) impairs et (b) pairs.

Figure 4-2: Spectres de réflectance AVIRIS: a) sans correction et b) avec correction atmosphérique.

Figure 4-3: Concentrations chimiques, exprimées en pourcentage de matière sèche, des aiguilles de pin de 1993 en fonction de l'âge des arbres où elles ont été collectées: a) azote, b) lignine et c) cellulose.

Figure 4-4: Spectres d'absorption d'aiguilles de pins séchées et réduites en poudre, mesurés avec deux spectromètres en laboratoire (a) NIR 6500 System et (b) Technicon InfraAlyser 450.

Figure 4-5: Corrélations (r^2) entre les concentrations chimiques réelles et prédites des aiguilles de pins dérivées des mesures effectuées avec le spectromètre Technicon InfraAlyser 450 pendant la campagne de 1991:

$$\text{(a) Azote: } [\text{Azote}] = 14-529.\log\left(\frac{R^*_{1734}}{R_{1680}}\right)+214.\log\left(\frac{R_{2336}}{R_{1680}}\right)-147.\log\left(\frac{R^*_{2348}}{R_{1680}}\right)$$

$$\text{(b) Cellulose: } [\text{Cellulose}] = 53+604.\log\left(\frac{R_{1982}}{R_{1680}}\right)-297.\log\left(\frac{R^*_{2270}}{R_{1680}}\right)+2042.\log\left(\frac{R^*_{1722}}{R_{1680}}\right)$$

Figure 4-6: Corrélogramme (r) entre les bandes spectrales de l'instrument NIR 6500 System et les composés chimiques.

Figure 4-7: Corrélations (r^2) entre les concentrations chimiques réelles et prédites des aiguilles de pins dérivées des mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 System pendant la campagne de 1993:

$$\text{(a) Azote: } [\text{Azote}] = 2+715.\log\left(\frac{R^*_{1490}}{R_{1680}}\right)-718.\log\left(\frac{R^*_{1498}}{R_{1680}}\right)-33.\log\left(\frac{R^*_{2194}}{R_{2230}}\right)$$

$$\text{(b) Lignine: } [\text{Lignine}] = 21+856.\log\left(\frac{R_{2206}}{R_{2230}}\right)-74.\log\left(\frac{R_{800}}{R_{1040}}\right)+3244.\log\left(\frac{R^*_{1684}}{R_{1680}}\right)$$

(c) Cellulose: $[\text{Cellulose}] = 41+1250.\log(\frac{R^*_{2360}}{R_{2230}})-25607.\log(\frac{R_{1036}}{R_{1040}})+304.\log(\frac{R_{800}}{R_{1040}})$

Figure 4-8: Corrélation (r^2) entre la concentration chimique en lignine réelle et prédite des aiguilles de pins dérivées de mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 System pendant la campagne de 1993. En fait, les concentrations réelles sont prédites à l'aide d'équations pré-établies et supposées exactes.

$$[\text{Lignine}] = 17+1317.\log(\frac{R_{2210}}{R_{2230}})-2592.\log(\frac{R^*_{1674}}{R_{1680}})+703.\log(\frac{R_{1082}}{R_{1040}})$$

Figure 4-9: Corrélations (r^2) entre les concentrations ou les pseudo-concentrations chimiques mesurées en laboratoire et les spectres ISM partiellement corrigés des effets atmosphériques:

(a) Azote: $[\text{Azote}] = 2+715.\log(\frac{R^*_{1490}}{R_{1680}})-718.\log(\frac{R^*_{1498}}{R_{1680}})-33.\log(\frac{R^*_{2194}}{R_{2230}})$

(b) Lignine: $[\text{Lignine}] = 17+1317.\log(\frac{R_{2210}}{R_{2230}})-2592.\log(\frac{R^*_{1674}}{R_{1680}})+703.\log(\frac{R_{1082}}{R_{1040}})$

Figure 4-10: Représentation schématique de la maquette de référence utilisée pour les simulations DART: a) profil vertical et b) profil horizontal.

Figure 4-11: Spectres de réflectances (—) et transmittances (- -) foliaires simulés avec le modèle PROSPECT pour des concentrations en cellulose variant de 15 à 45% de matière sèche (MS). N = 2.1, Eau = 0.0125 cm, MS = 0.0083 g/cm², C_{Chl} = 50 µg/cm², C_{Lig} = 15% MS, C_{Prot} = 7% MS, C_{Amidon} = 20% MS, $C_{HémiCell}$ = 1% MS, C_{Sucre} = 1% MS.

Figure 4-12: Réflectances DART du couvert en fonction de l'albédo foliaire et pour différentes réflectances du sol: a) visée au nadir, b) visée oblique ($\theta_v = 31.2°;\phi_v = 102°$), c) visée en rétrodiffusion ($\theta_v = 31.2°;\phi_v = 222°$).

Figure 4-13: Spectres DART du couvert au nadir pour une concentration (a) en cellulose variant de 15 à 45% de MS et (b) une concentration en protéines variant de 1 à 15.5% de MS. Le sous-bois est homogène (LAI = 2) et possède des propriétés optiques foliaires indépendantes de celles du couvert.

Figure 4-14: Corrélogramme de la réflectance du couvert au nadir à 1300 nm avec la réflectance du couvert dans le domaine spectral [1300 nm 2400 nm].

Figure 4-15: Réflectances d'un sous-bois homogène pour différents LAI de 0 à 3. a) et b) correspondent à des espèces végétales différentes et donc à des propriétés optiques foliaires différentes.

Figure 4-16: Corrélogramme entre la réflectance de couvert simulé avec des concentrations variables en cellulose et b) protéine. Le sous-bois est homogène (LAI = 2) et comprend une seule espèce végétale (SB2).

Figure 4-17: Corrélogramme entre la concentration en (a) cellulose et en (b) protéine, et la réflectance du couvert [1300 2400 nm] pour un sous-bois comprenant 4 espèces végétales (SB5).

Figure 4-18: Corrélations (r^2) entre les concentrations réelles et estimées de la (a) cellulose, de la (b,d) lignine et des (c) protéines établies sur des spectres de réflectances R ou dérivés en ln(1/R) et dans le cas d'un sous-bois de type 4 (a,b,c) et 5 (d). Les équations prédictives sont:

(a) $[\text{Cellulose}] = -2.2 + 3.296.\ln(\frac{1}{R(_{1300})}) - 1.5994.\ln(\frac{1}{R(_{1660})}) + 0.3158.\ln(\frac{1}{R(_{1880})})$

$$(b)\,[\text{Lignine}] = 0.57687 + 0.57.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 2.906.\ln\left(\frac{1}{R(_{1400*})}\right) + 2.251.\ln\left(\frac{1}{R(_{2210})}\right)$$

$$(c)\,[\text{Protéine}] = 0.0495 + 8.274.\ln\left(\frac{1}{R(_{1710})}\right) - 7.43.\ln\left(\frac{1}{R(_{1650})}\right) - 1.04.\ln\left(\frac{1}{R(_{1630})}\right)$$

$$(d)\,[\text{Lignine}] = -0.06856 - 0.86.R(_{1300}) + 93.31.R(_{1400*}) - 81.R(_{1530*})$$

Figure 4-19: Différence absolue des réflectances foliaires correspondant aux spectres de concentrations minimales et maximales en cellulose, lignine et protéine.

Figure 4-20: Spectres dérivées 1ère de la réflectance foliaire pour les concentrations minimale (— 15% de MS) et maximale (---45% de MS) en cellulose.

Figure 4-21: Valeur absolue de la différence des spectres dérivées 1ère de la réflectance foliaire pour les concentrations minimale (15% de MS) et maximale (45% de MS) en cellulose.

Figure 4-22: Corrélations (r^2) entre les concentrations réelles et estimées de cellulose établies pour un sous-bois comportant 4 espèces végétales. La courbe provient de l'équation prédictive suivante basée sur les dérivées premières des réflectances:

$$[\text{Cellulose}] = 0.6626\text{-}2431.R'(\lambda_{2210})\text{-}2985.R'(\lambda_{2220})+1996.R'(\lambda_{1690})$$

Figure 4-23: Corrélations (r^2) entre les concentrations de cellulose et de lignine mesurées et estimées pour un paysage de LAI = 4. Les équations prédictives et les équations de régression avant étalonnage sont :

$$\begin{cases} [\text{Cellulose}] = -2.413 + 3.877.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 4.190.\ln\left(\frac{1}{R(_{1710*})}\right) + 2.505.\ln\left(\frac{1}{R(_{1550})}\right) \\ [\text{Cellulose estimée}] = 1.0141.\ [\text{Cellulose mesurée}] - 0.072 \end{cases}$$

$$\begin{cases} [\text{Protéine}] = -0.18732 - 1.21.R(_{1710}) + 100.73.R(_{1400}) - 79.2.R(_{1530}) \\ [\text{Protéine estimée}] = 0.7353.\ [\text{Protéine mesurée}] + 0.0995 \end{cases}$$

CHAPITRE 5: VERS UNE MODÉLISATION «MULTI-ÉCHELLE»

Figure 5-1: Réflectances DART et SAIL (plan principal) d'un sous-bois homogène composé de 1 à 20 couches de végétation au dessus d'un sol lambertien ($\rho_{sol} = 20\%$, $\rho_f = \tau_f = 10\%$ et LAI = 3 ; $\theta_s = 148.52°$ et $\phi_s = 222°$).

Figure 5-2: Augmentation de l'atténuation des rayons diffusés pour des angles supérieurs à 45° dans le cas de couvert représenté par une seule couche foliaire.

Figure 5-3: Algorithme pour le calcul de la fonction de phase d'un bloc «sous-bois».

Figure 5-4: Représentation simplifiée d'une plantation de pins comprenant un couvert arboré et un sous-bois. La petite figure représente les vues de profil et de dessus du sous-bois.

Figure 5-5: Simulations DART d'une plantation de pins pour plusieurs angles zénithaux d'observation dans le plan principal (a) et (c) $\theta_v = 0°$ et (b) $\theta_v = 15°$. Le sous-bois a été simulé avec l'approche « multi-échelle » (a) et (b) et de manière « exacte » (c).

Figure 5-6: Profil de BRDF d'une plantation dans le plan principal simulée avec différents sous-bois.
Figure 5-7: BRDF de sous-bois. La réflectance du sous-bois hétérogène est beaucoup plus élevée que celle des sous-bois homogènes. Cet effet est expliqué par la forte réflectance du sol qui est beaucoup mieux perçu dans le cas d'un sous-bois hétérogène que dans le cas d'un sous-bois homogène.
Figure 5-8: Représentation schématique de l'éclairement d'un houppier ellipsoïdal. Les cellules situées sur la partie externe de la maquette et représentées ici en grisé clair ne correspondent pas à la scène mais aux cellules « source » du rayonnement. La présence ou l'absence de flèche indique si la cellule émet ou non un rayonnement incident.
Figure 5-9: Fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)/\Delta\Omega_v$ de houppiers de forme cubique (a,c) et sphérique (b,d). Les éléments foliaires ont une réflectance et transmittance de 10% et l'inclinaison des feuilles est de type sphérique (a,b) et planophile (c,d). L'indice foliaire est 3 et la direction d'illumination est la verticale.
Figure 5-10: Profil des fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)/\Delta\Omega_v$ de houppiers de la figure 5-9 dans la plan principal.
Figure 5-11: Profil des fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)/\Delta\Omega_v$ de houppiers de la figure 5-9 dans la plan principal pour une illumination oblique ($\theta_s = 148.52°$ et $\phi_s = 222°$).
Figure 5-12: Erreur relative du flux intercepté par un houppier de forme cubique pour une simulation à haute résolution spatiale et une simulation « multi-échelle ». Les éléments foliaires du houppier sont distribués de manière sphérique.

ANNEXES

Figure A1 : Compositions colorées RAMI des parcelles de pins de la forêt de Nézer.
Figure A2-1: Modélisation de la structure interne de la feuille par PROSPECT. L'indice α est le demi-angle du cône qui inclue le rayonnement incident sur la feuille. Il vaut 90° pour toutes les couches à l'exception de la première.
Figure A2-2: Simulation Prospect pour $N = 2$, $C_{ab} = 50\ \mu g.cm^{-2}$, $C_w = 125\ \mu m$, $C_{lig} = 0.15\ g.cm^{-2}$, $C_{cell} = 0.28\ g.cm^{-2}$ et $C_{prot} = 0.07\ g.cm^{-2}$.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1er: MODÉLISATION PHYSIQUE - APPLICATION AUX SYSTÈMES FORESTIERS

Tableau 1-1: Principaux types de modèles et de milieu de propagation associés.

CHAPITRE 2: LE MODÈLE DART

Tableau 2-1: Caractéristiques physiques nécessaires pour la description des mécanismes d'interactions des différents types de cellules avec le modèle DART. dbh est le diamètre du tronc à 1.30 m du sol.

Tableau 2-2: Exemples de fonction de phase $P(\Omega_s, \Omega_v)$ extraites de la littérature. Le coefficient g de la fonction de phase de Henyey et Greenstein correspond à un facteur d'asymétrie qui quantifie le comportement anisotrope de la lumière diffusée par une seule particule.

Tableau 2-3: Différences relatives (%) maximale et moyenne de la réflectance entre les itérations successives et l'itération de convergence énergétique d'une plantation forestière de taux de couverture de (1) 34% et (2) 53%. Simulations dans (a) le visible (toutes les itérations) et (b) le proche infrarouge (5 itérations sur 10).

Tableau 2-4: Différences relatives (%) maximale et moyenne de la réflectance entre les itérations successives et l'itération de convergence énergétique d'une plantation forestière de taux de couverture de (1) 34% et (2) 53%. Simulations dans (a) le visible et (b) le proche infrarouge avec l'approche de Gauss-Siedel.

Tableau 2-5: Comparaison des différences relatives (%) maximale et moyenne de la réflectance entre trois méthodes (Méthode classique, Approche de Gauss-Siedel et fonction d'extrapolation) pour l'obtention de la convergence énergétique d'une plantation forestière de taux de couverture de (1) 34% et (2) 53%. Simulations dans (a) le visible et (b) le proche infrarouge.

Tableau 2-6: Réflectances DART moyennes (%) de différents éléments d'une parcelle forestière au nadir pour différentes configurations d'illumination et dans les domaines spectraux du vert, rouge et proche infrarouge.

Tableau 2-7: Réflectances DART moyennes (%) d'une parcelle pour différentes configurations d'illumination et d'observation dans le domaine spectral du vert.

Tableau 2-8: Exemples de conditions expérimentales pour le calcul de paramètres caractéristiques de l'atmosphère avec le logiciel 6S (Tanré et al., 1990).

Tableau 2-9: Influence de la visibilité atmosphérique sur des paramètres atmosphériques, calculés avec le modèle 6S dans le domaine spectral du vert et pour une configuration angulaire d'observation au nadir.

Tableau 2-10: Influence de la visibilité atmosphérique sur la réflectance d'une parcelle.

CHAPITRE 3: MODÉLISATION ET TEXTURE DES COUVERTS FORESTIERS

Tableau 3-1: Caractéristiques dendrométriques moyennes de 5 parcelles de pins de la forêt de Nézer (Landes) en 1993.

Tableau 3-2: Éclairement solaire (W/m²/nm) au-dessus de l'atmosphère (TOA) et au niveau du sol dans les 3 bandes spectrales du capteur RAMI.

Tableau 3-3: Coefficients d'étalonnages RAMI $C_{étalon}$ (m².sr.µm/W) dans les 3 canaux spectraux (axe de vol n°3).

Tableau 3-4: Réflectances apparentes R_{3000} et corrigés R (%) de sept parcelles. L'axe de vol considéré est le N°3.

Tableau 3-5: Réflectances moyennes DART (%) de différentes parcelles dans le vert, rouge et proche infrarouge.

Tableau 3-6: Réflectances moyennes (%) au nadir de 4 parcelles (vert (V), rouge (R) et proche infrarouge (PIR)).

Tableau 3-7: Radiométrie (CN) d'une image DART à 255 niveaux de gris (Réfl = 0.00029484*CN+0.000656) et de 4 images représentant la même scène avec 4 niveaux de gris.

Tableau 3-8: Paliers et portées de simulations DART d'une plantation forestière réalisées avec 255 ou 4 niveaux de gris.

Tableau 3-9: Variance et réflectance moyenne des images DART. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés pour des parcelles à LAI constant et densité foliaire (µ) constante (Fig. 3-24).

Tableau 3-10: Variance des images DART. Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés dans le cas de parcelles à LAI constant et densité foliaire constante (Fig. 3-27).

Tableau 3-11: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des parcelles simulées pour différents diamètres de couronnes (1.5 à 4.5 m) avec un LAI ou une densité volumique foliaire constante.

Tableau 3-12: Réflectances PIR moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers de parcelles pour des diamètres de couronnes entre 1.5 et 4.5 m. LAI = 2.92.

Tableau 3-13: Variance d'images DART (PIR) (Fig. 3-31). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.

Tableau 3-14: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des parcelles simulées pour différents diamètres de couronnes (1.5 à 4.5 m) et avec un LAI ou une densité volumique foliaire constante.

Tableau 3-15: Variance d'images DART (Fig. 3-33). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.

Tableau 3-16: Variance d'images DART (Fig. 3-35). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.

Tableau 3-17: Variance et réflectance moyenne d'images DART (Fig. 3-37). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.

Tableau 3-18: Réflectances totales et moyennes (%) du sol éclairé, sol à l'ombre et des houppiers dans le visible pour différentes itérations (ITER.). LAI de 1 à 10. SKYL = 0, 25 et 50%.

Tableau 3-19: Variance des images DART. Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés. Simulations effectuées dans le visible avec un SKYL de 0% et 25%. LAI = 1 à 10.
Tableau 3-20: Réflectance totales et moyennes (%) du sol éclairé ou à l'ombre et des houppiers d'une parcelle forestière dans le proche infrarouge. SKYL = 0 et 25% et LAI = 1 à 10.
Tableau 3-21: Variance des images DART. Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés. Simulations dans le proche infrarouge effectuées avec un SKYL égal à 0% et 25%.
Tableau 3-22: Réflectance moyenne (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers d'une parcelle simulée dans le visible pour LAI = 2.92 et pour 3 angles azimutaux solaires (90°, 45°, 0°). Le sol est supposé lambertien.
Tableau 3-23: Variance d'images DART (LAI = 2.92). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.
Tableau 3-24: Variance de simulations DART observées à 0°, 14.4°, 31.2°, 48° et 64.8° avec un angle azimutal de 230°. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes associés (LAI= 2.92).
Tableau 3-25: Réflectances totales et moyennes du sol éclairé ou à l'ombre et des houppiers d'une parcelle de LAI = 2.92.
Tableau 3-26: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des simulations DART « pleine résolution » 0.5 m* et 1.5 m* et de résolution 1.5 m obtenue par moyennage de la simulation de résolution 0.5 m*.
Tableau 3-27: Variance et réflectance moyenne d'images DART « pleine résolution » (*) et dégradées par moyennage de l'image « pleine résolution » à 0.5 m. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes verticaux et horizontaux associés.
Tableau 3-28: Variance et paliers des variogrammes d'images DART « pleine résolution » (*) et dégradées par moyennage de l'image « pleine résolution » à 0.5 m. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes verticaux et horizontaux associés.
Tableau 3-29: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des simulations DART « pleine résolution » 0.5 m* et 1.5 m* et de résolution 1.5 m obtenue par moyennage de la simulation de résolution 0.5 m*.
Tableau 3-30: Ordre de grandeur des paliers et portées de variogrammes dans le cas de variations (a) des caractéristiques biophysiques d'une plantation forestière et (b) des paramètres d'acquisition du capteur. Simulations dans le visible (VIS) et le proche infrarouge (PIR).
Tableau 3-31: Paliers et indicateurs de portée des variogrammes calculés sur les images RAMI de parcelles forestières dans les domaines spectraux du visible (vert) et de proche infrarouge. Les 4 axes de vol ont été considérés.

CHAPITRE 4: APPORTS POTENTIELS DE LA HAUTE RÉSOLUTION SPECTRALE POUR LES ÉTUDES FORESTIÈRES

Tableau 4-1: Coefficient de corrélation (%) entre les concentrations, exprimées en pourcentage de matière sèche, d'azote (N), lignine (L) et cellulose (Cell. S - Cell. W) d'aiguilles de pin. Les valeurs de la campagne de 1993 sont entre parenthèses.

Tableau 4-2: Bandes spectrales du spectromètre Technicon InfraAlyser 450. Les bandes centrées sur des bandes d'absorption d'éléments chimiques sont mentionnés par une croix (×).

Tableau 4-3: Longueurs d'onde optimales déterminées par régression pas à pas sur les réflectances d'aiguilles de pin obtenues en laboratoire avec le Technicon InfraAlyser 450. Les corrélations (r^2) associées sont indiquées. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec le signe *.

Tableau 4-4: Longueurs d'onde optimales et corrélations (r^2) associées (intervalle de confiance de 95%) pour les mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 Système pendant la campagne de 1993. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec le signe *.

Tableau 4-5: Corrélations (r) entre les mesures spectrales effectuées avec le NIR 6500 System et le Technicon InfraAlyser 450 pour tous les échantillons collectés sur le terrain durant la campagne 1993.

Tableau 4-6: Longueurs d'onde optimales (nm) et corrélations (r^2) associées (intervalle de confiance de 95%) pour les mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 Système et les concentrations chimiques prédites à partir de relations déjà existantes pendant la campagne de 1993. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec le signe *.

Tableau 4-7: Corrélations (r^2) et intervalle de confiance à 95% résultant de l'application des équations prédictives établies en laboratoire avec le spectromètre NIR 6500 System sur les spectres ISM partiellement corrigés des effets atmosphériques. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec le signe *.

Tableau 4-8: Corrélations (r^2), intervalles de confiance à 95% de r^2 et erreurs quadratiques moyennes (% de MS) entre les concentrations chimiques simulées et prédites. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique à partir des (b) spectres DART de réflectance du couvert (R) ou des (a) spectres dérivés en ln(1/R) sont mentionnées selon l'ordre de sélection. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption du composé sont repérées avec le signe *.

Tableau 4-9: Corrélations (r^2), intervalles de confiance à 95% de r^2 et erreurs quadratiques moyennes (% de MS) entre concentrations chimiques simulées et prédites. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique sur les spectres dérivées $1^{ère}$ de réflectance du couvert sont mentionnées selon l'ordre de sélection.

Tableau 4-10: Corrélations (r^2) et erreurs quadratiques moyennes (% de MS) entre concentrations chimiques simulées et prédites pour 3 directions d'observation en visée oblique. Les régressions ont été établies à partir des spectres en (1) ln(1/R) et en (2) réflectances R du couvert.

Tableau 4-11: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée de LAI= 1, 2.5 et 4 en visée verticale.

Tableau 4-12: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée de LAI = 1, 2.5 et 4 en visée verticale. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique sur les spectres

dérivées premières de réflectance du couvert sont mentionnées selon l'ordre de sélection.

Tableau 4-13: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, la (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée dont le taux de couverture est égal à 25.7%, 47.9% et 67.4% (visée verticale).

Tableau 4-14: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée de taux de couverture = 25.7%, 47.9% et 67.4% en visée verticale. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique sur les spectres dérivées premières de réflectance du couvert sont mentionnées selon l'ordre de sélection.

Tableau 4-15: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, la (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée dont le taux de couverture est égal à 25.7%, 47.9% et 67.4% (visée oblique).

CHAPITRE 5: VERS UNE MODÉLISATION «MULTI-ÉCHELLE»

Tableau 5-1: Transmittances de houppier cubique et sphérique pour des LAD sphériques et planophiles.

ABREVIATIONS

AIS	Airborne Imaging Spectrometer.
ARAT	Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection.
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer.
AVIRIS	Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer.
BRDF	Bidiretional Reflectance Distribution Function.
CCD	Charged Coupled Device.
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère.
CESR	Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements.
CN	Compte Numérique.
CNES	Centre National d'Études Spatiales.
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique.
DART	Discrete Anisotropic Radiative Transfer.
DBH	Diameter at Breast Heigh.
DESPA	Département d'Etude SPAtiale.
EOS	Earth Observing System.
FFT	Fast Fourier Transformation.
HRS	Haute Résolution Spectrale.
HRV	Haute Résolution Visible.
IAS	Institut d'Astrophysique Spatiale.
IFOV	Instantaneous Field Of View.
IGBP	International Geosphere-Biosphere Program.
ISM	Infrared SpectroMeter.
JPL	Jet Propulsion Laboratory.
LAD	Leaf Angular Distribution.
LAI	Leaf Area Index.
MS	Matière Sèche.
NASA	National Aeronautic and Space Administration.
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index
OPM	Observatoire Paris-Meudon.
POLDER	POLarization and Directional Earth Reflectance.
RMSE	Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne).
SAIL	Scattering by Arbitrary Inclined Leaves.
SEC	Erreur Standart de Calibration.
SEP	Erreur Standart de Prédiction.
SNV	Variation Standart Normale.
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre.
TM	Thematic Mapper.
UPS	Université Paul Sabatier.
WCRP	World Climate Research Program.

NOTATIONS DU MODÈLE DART

$df(\Omega)$, $nf(\Omega)$, $p(\Omega)$
: Proportions de rayonnement résultant des mécanismes de diffusion volumique, surfacique et de polarisation.

$f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $f_d(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $f_s(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$
: Fonctions de diffusion totale, lambertienne et spéculaire des éléments foliaires de type j et de normale d'orientation (Ω_f).

$\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}$
: Fonction de distribution normalisée des directions d'éléments foliaires de type j

i, I
: Indice et nombre total de cellules élémentaires de même type.

j, J
: Indice et nombre total de types des cellules élémentaires (Vide = 0, Sol = 1, Sous-bois = 2, Tronc = 3,Eléments foliaires de la canopée = 4, Eau = 5, etc.).

k
: Ordre d'itération du modèle DART.

l,m
: Indices pour le développement des harmoniques sphériques.

n, N
: Indice et nombre total de directions ou de secteurs angulaires de l'espace.

n_j
: Indice de réfraction de la surface des éléments foliaires de type j.

n, **N**
: Indice et nombre total de rayons incidents sur une cellule.

s_f
: Dimension foliaire.

u_f
: Densité foliaire des cellules « feuille ».

(x,y,z)
: Coordonnées du centre d'une cellule élémentaire.

C_{lm}
: Coefficient associé aux harmoniques sphériques normalisées.

$E_s(\Omega_s)$
: Constante énergétique solaire.

$G(j,\Omega_n)$
: Projection moyenne d'une surface unité d'éléments foliaires de type j sur un plan perpendiculaire à la direction (Ω_n).

$I(\Omega_n)$
: Intensité spécifique selon la direction $(\Omega_n,\Delta\Omega_n)$.

$K_j(\kappa,\Psi_{fs})$
: Facteur de correction du flux spéculaire caractérisant la rugosité des cuticules des éléments foliaires de type j.

L
: Ordre maximum du développement des harmoniques sphériques.

$L_a(\Omega_n)$
: Luminance atmosphérique selon les directions (Ω_n).

LAD
: Distribution angulaire foliaire.

LAI
: Indice foliaire.

M_s
: « Point milieu » situé sur la direction de propagation à une distance Δr_i du point d'entrée dans la cellule telle que le flux intercepté avant ce point est égal au flux intercepté après ce point.

N_{cell}
: Nombre de cellules élémentaires de la scène.

N'
: Nombre de directions descendantes de l'espace.

$P_{lm}(x)$
: Polynôme associé de Legendre.

$R(\Omega_v)$
: Facteur de réflectance bidirectionnelle selon la direction (Ω_v).

$R_s(n_j,\Psi_{fs})$, $R_p(n_j,\Psi_{fs})$
: Coefficients de réflectance spéculaire et polarisée moyen de Fresnel des éléments foliaires de type j.

SKYL
: Proportion de rayonnement atmosphérique incident.

$T(j,\Omega_s,\Omega_v)$, $T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$, $T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)$
: Fonctions de diffusion totale, volumique et surfacique d'une cellule de type j.

$T(\Delta l_i,\Omega_n)$
: Fonction de transmission d'un flux dans la direction (Ω_n) à travers une cellule i sur une longueur de traversée Δl_i.

T_1, T_2 Seuils d'arrêt énergétique des flux solaires incidents et des flux diffusés.

$<T_i>$ Transmission moyenne d'un cellule i pour les diffusions multiples.

$W(0,\Omega_n)$ Flux incident dans la direction (Ω_n).

$W(\Omega_n)$, $W_{nf}(\Omega_n)$, $W_p(\Omega_n)$
Flux total, lié aux diffusions surfaciques et polarisés dans la direction (Ω_n).

$W_a(\Delta l_i,\Omega_n)$ Flux absorbé dans la direction (Ω_n) par une cellule i sur le trajet Δl_i.

$W_{intercepté}(\Delta l_i,\Omega_n)$
Flux intercepté dans la direction (Ω_n) par une cellule i sur le trajet Δl_i.

$W_{out}(\Delta l_i,\Omega_n)$ Flux transmis dans la direction (Ω_n) par une cellule i après un trajet Δl_i.

$W(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $W_{,d}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $W_{,s}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $W_{,p}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$
Flux total, lié aux diffusions volumiques, surfaciques et polarisé, diffusé de la direction (Ω_s) vers la direction (Ω_v) depuis le «point milieu».

$W_{,intercepté}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$
Flux intercepté après une interaction par une cellule i

$W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $W_{d1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $W_{s1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, $W_{p1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$
Flux total, lié aux diffusions volumiques, surfaciques, et polarisé, diffusé de la direction (Ω_s) dans la direction (Ω_v) par une cellule i (diffusion simple).

$W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$, $W_{dM}(\Delta l_i,\Omega_s)$, $W_{sM}(\Delta l_i,\Omega_s)$
Flux total, lié aux diffusions volumiques, surfaciques, diffusé par une cellule i (diffusions multiples).

$Y_{lm}(\theta,\phi)$ Harmonique sphérique normalisée.

$\alpha(r,\Omega)$ Coefficient d'extinction dans la direction (Ω) ; Probabilité par unité de longueur pour qu'un photon soit intercepté.

$\alpha_d(r,\Omega'\rightarrow\Omega)$ Section efficace de diffusion différentielle pour qu'un photon provenant de la direction (Ω') soit diffusé dans un angle solide unité selon la direction (Ω).

η Coefficient d'interception des cellules «tronc».

μ,η,ξ Cosinus directeurs selon les axes (Ox), (Oy) et (Oz).

μ_n, μ_s, μ_v Cosinus des angles zénithaux θ_n, θ_s et θ_v.

ρ_{dj}, τ_{dj} Réflectance et transmittance hémisphériques des éléments foliaires de type j.

ω_j, ω_{dj}, ω_{sj} Albédo moyenne, de diffusion et spéculaire des éléments foliaires de type j.

ΔX, ΔY, ΔZ Dimensions de la scène selon les axes (Ox), (Oy) et (Oz).

Δl_i Longueur de traversée d'un rayon à travers une cellule i.

Δr_i Distance entre le point milieu et le point d'entrée dans la cellule i.

Δs_i Distance entre le point milieu et le point de sortie dans la cellule i.

Δx, Δy, Δz Dimensions des cellules élémentaires suivant les axes (Ox), (Oy), (Oz).

$(\Delta\Omega_n) \equiv (\Delta\theta_n,\Delta\phi_n)$
Secteur angulaire associé à la direction (Ω_n). $(\Delta\theta_n,\Delta\phi_n)$ sont les intervalles zénithaux et azimutaux associés.

(Ω_f), $(\Delta\Omega_f)$ Direction de la normale foliaire et secteur angulaire associé.

(Ω^*_f), $(\Delta\Omega^*_f)$ Direction de la normale foliaire et secteur angulaire associé satisfaisant les conditions de spécularité.

$(\Omega_n) \equiv (\theta_n,\phi_n)$ Direction centrale du secteur angulaire $(\Delta\Omega_n)$ définie par un angle zénithal et azimutal. $(\Omega_s) \equiv (\theta_s,\phi_s)$, $(\Omega_v) \equiv (\theta_v,\phi_v)$ sont respectivement les directions solaire et d'observation.

$<\Sigma W>_{1,2}$ Valeur maximale des flux moyens diffusés durant la 1ère et la 2ème itération

Ψ_{fs} Angle azimutal relatif entre la direction du rayonnement solaire (Ω_s) et la normale foliaire (Ω_n).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION

Contexte général de la thèse

La biosphère continentale joue un rôle majeur au niveau du système « atmosphère - environnement terrestre ». Ainsi, le climat est très dépendant des échanges d'énergie et de matière (eau, gaz, etc.) entre les surfaces terrestres (végétation, sol) et l'atmosphère. De nos jours, l'activité anthropique influence beaucoup ces échanges « atmosphère - biosphère » et met en cause l'équilibre naturel de la planète (bilan radiatif, climats, cycles biogéochimiques de l'eau ou du carbone, etc.). Ceci est en particulier le cas avec le déboisement intensif des forêts tropicales au profit de zones agricoles et les rejets croissants de produits non dégradables qui entraînent une contamination des sols, de l'eau et de l'atmosphère (CO_2, CH_4), etc.

Notre société a pris conscience de ces problèmes très récemment. Ainsi, depuis les deux dernières décennies, la communauté scientifique s'est mobilisée pour étudier l'évolution de l'environnement terrestre et du climat planétaire. De grands programmes scientifiques internationaux tels que International Geosphere - Biosphere Program, World Climate Research Program ou plus récemment Earth Observing System ont été élaborés. Ils visent à étudier et modéliser les échanges globaux énergétiques et chimiques dans un souci de mieux contrôler et identifier les causes des modifications de la biosphère. De telles études ont pour objectif l'amélioration de la gestion des ressources terrestres et océaniques et de la surveillance de l'environnement.

L'analyse à l'échelle planétaire, des interactions entre la biosphère continentale et l'atmosphère s'appuie de plus en plus sur la modélisation de ces interactions et sur l'analyse de données à différentes échelles de temps et d'espace. La télédétection spatiale est un outil adapté pour l'acquisition de telles données. Cependant, la condition absolument indispensable pour utiliser les données spatiales est évidemment de pouvoir extraire une information thématique fiable. La simulation de la mesure de télédétection à partir de la modélisation du transfert radiatif dans les couverts végétaux et l'atmosphère, permet d'aborder ce problème de manière systématique et quantitative. Cette approche est cependant difficile à mettre en oeuvre du fait de l'absence, ou plutôt rareté, de modèles capables de prendre en compte la complexité des milieux terrestres observés.

Objectif de la thèse

Cette thèse se situe dans le contexte de l'étude de la biosphère continentale et de son fonctionnement, en particulier à partir de mesures de télédétection spatiale. L'approche retenue est basée sur la modélisation du comportement optique des milieux observés dans les domaines spectraux du visible et de l'infrarouge.

La première partie (Chap. 1 et 2) de cette thèse présente un apport théorique centré sur le développement d'un nouveau modèle de transfert radiatif. La deuxième partie (Chap. 3 à 5) illustre l'apport de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des surfaces terrestres, en particulier des couverts forestiers, avec des mesures acquises dans le visible et l'infrarouge. Deux domaines particuliers ont été considérés: l'analyse texturale et la spectrométrie. Cette partie se veut plus méthodologique et technique.

Plan de la thèse

Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse sont divisés en 5 chapitres:

- Le chapitre 1 fait un état de l'art des divers types de modèles de transfert radiatif développés jusqu'ici en insistant sur les hypothèses simplificatrices de chacun.
- Le chapitre 2 présente un nouveau modèle de transfert radiatif appelé DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) qui répond à la problématique exposée précédemment. Il s'appuie sur une modélisation précise des interactions à l'intérieur du couvert végétal et une bonne représentation tridimensionnelle de la canopée. La base physique du modèle et quelques résultats de simulation sont exposés et analysés. Le développement de ce modèle a débuté avec mon stage de DEA (Pinel, 1993). J'ai également consacré ma première année de thèse à son développement, puis Valérie Démarez a poursuivi ce travail (ex : distinction des flux foliaires / non foliaires, méthode d'accélération de « Gauss-Siedel » pour la convergence énergétique) et actuellement Patrick Estève et Pierre Guillevic, tous trois membres de l'équipe « Physique de la Mesure et Modélisation» du CESBIO.

Les chapitres suivants ont consisté à étudier l'apport de la modélisation 3-D du transfert radiatif et par conséquent l'intérêt du modèle DART pour deux applications:

- Dans le chapitre 3, la modélisation a permis d'étudier la sensibilité de l'information texturale d'images de télédétection à plusieurs paramètres biophysiques de la canopée (LAI, taux de couverture, résolution spatiale, etc.). Les résultats théoriques ont été comparés avec des données aéroportées Push-Broom RAMI (Simulateur SPOT) acquises au-dessus d'un couvert forestier des Landes.
- Le chapitre 4 présente une étude expérimentale et théorique pour la détermination de concentrations biochimiques (azote, lignine, cellulose) du couvert par télédétection à « haute résolution spectrale ». Ces informations sont essentielles pour l'étude du fonctionnement de la biosphère continentale (productivité primaire nette, taux de décomposition de la litière, disponibilité en nutriments, etc.). De nombreux travaux empiriques ont déjà permis d'établir des « relations prédictives » qui expriment les concentrations biochimiques en fonction de mesures spectrométriques de télédétection. Cependant, quel est le domaine de validité de ces relations? La modélisation physique permet d'aborder cette question sous un jour nouveau.
- Un problème également essentiel pour l'étude de la biosphère continentale par télédétection spatiale est celui de la signification de l'information acquise aux différentes échelles d'analyse possibles. Il est particulièrement important pour les études effectuées avec des observations dites à basse résolution spatiale (≈ 1 km). Ainsi, alors que les informations (indice foliaire, taux de couverture, etc.) dérivées d'observations à haute résolution spatiale (≈ 10/20 m) sont assez facilement reliées aux paramètres mesurés in-situ, il n'en est pas de même dans le cas d'observations à basse résolution. Dans ce contexte la modélisation est un outil potentiellement très intéressant pour évaluer la signification de l'information obtenue à différentes échelles d'analyse. Cette approche est cependant très difficile en l'absence de modèles valides à des échelles d'analyse à la fois métriques et kilométriques. Le chapitre 5 présente une approche originale dite « multi-échelle » d'aborder ce problème.

CHAPITRE I^{er}

MODÉLISATION PHYSIQUE
- APPLICATION AUX SYSTÈMES FORESTIERS -

I. INTRODUCTION

Un objectif de la modélisation du transfert radiatif dans les milieux terrestres est de mieux comprendre et analyser les relations existant entre les mesures spatiales et les caractéristiques biophysiques et biochimiques des milieux. Ainsi, elle permet de « comprendre » les observations acquises dans différentes configurations expérimentales ce qui rend possible les études multi-date, multi-capteurs, etc. Cet aspect est important car les surfaces terrestres diffusent le rayonnement solaire de manière anisotrope. La diffusion d'un milieu est représentée par sa fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (Bidirectional Reflectance Distribution Function), à une longueur d'onde et pour une configuration angulaire d'illumination donnée. Elle est directement liée aux propriétés optiques et géométriques des éléments du milieu.

Selon les cas, différents niveaux d'influence peuvent être distingués. Ainsi, la BRDF d'un couvert forestier dépend à la fois des éléments foliaires (densité, dimensions, orientation, distribution spatiale, propriétés optiques, etc.), des couronnes (dimensions, distribution spatiale, forme, etc.) et du sous-bois (propriétés optiques, densité, etc.). L'interaction de ces différents niveaux d'influence rend très difficile l'interprétation de la BRDF de couverts en fonction de leurs caractéristiques biophysiques. De par leur capacité à déterminer les contributions de toutes les composantes du milieu, les modèles de transfert radiatif constituent donc des outils d'analyse indispensables pour l'étude de la biosphère continentale à partir de données satellitaires. Les modèles peuvent être utilisés en mode direct ou inverse, seuls ou couplés avec d'autres modèles qui simulent le transfert radiatif atmosphérique, le fonctionnement photosynthétique foliaire, etc. Ils permettent ainsi de préciser le domaine de validité des mesures spatiales pour la détermination des caractéristiques biophysiques et biochimiques (biomasse foliaire, chlorophylle, etc.) des surfaces terrestres. De plus, leur utilisation permet de mieux assimiler les données de télédétection dans les modèles de fonctionnement de la biosphère et les modèles couplés « Atmosphère - Biosphère » d'échange de matière et d'énergie.

II. LES MODELES DE REFLECTANCE

La réflectance des couverts dérive du transfert radiatif et par conséquent des interactions des ondes électromagnétiques avec les éléments du milieu végétal (feuilles, tiges, branches, etc.), compte tenu de leurs caractéristiques géométriques et électromagnétiques (constante diélectrique, perméabilité, conductivité, etc.). L'impossibilité de simuler de manière exacte ces interactions explique pourquoi différentes approches et simplifications sont utilisées dans les modèles de transfert radiatif et de réflectance. Ces différentes approches sont résumées dans l'étude bibliographique qui suit. Cette étude n'est pas exhaustive. Elle a simplement pour objectif de présenter les principaux types de modèles développés à ce jour par la communauté scientifique. Un ou deux exemples seront présentés pour chaque type de modèle.

D'une manière générale, la complexité des modèles croît avec le degré de précision utilisé pour représenter les interactions électromagnétiques. Ainsi, les modèles empiriques, aussi appelés modèles analytiques, correspondent à de simples expressions analytiques dont les paramètres doivent être ajustés pour obtenir des simulations réalistes de la BRDF. Ils ne modélisent pas les mécanismes physiques mis en jeu, contrairement aux autres modèles souvent regroupés sous l'appellation «modèles physiques». Ces derniers se distinguent:

- par la manière dont le milieu de propagation est pris en compte (milieu continu ou discontinu). Ainsi, le milieu peut être représenté: (1) par la superposition de couches

horizontales constituées d'éléments diffusants et absorbants distribués uniformément (le milieu est alors dit « continu » ou « turbide ») ou bien (2) par une distribution spatiale discontinue d'éléments volumiques ou surfaciques (le milieu est alors dit « discontinu » ou « discret »). Les mécanismes physiques mis en jeu sont simulés à partir des propriétés optiques (absorption, réflexion, transmission) et géométriques (orientation des éléments foliaires, etc.) caractéristiques du milieu.

- par l'approche mathématique utilisée (discrétisation de l'espace des directions, méthode géométrique, méthode intégrale, etc.) pour simuler le transfert radiatif c'est-à-dire résoudre l'équation générale du transfert radiatif qui décrit la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu diffusant et absorbant. Cette équation représente la propagation de l'intensité spécifique $I(r,\Omega)$ à la position r et dans la direction (Ω):

$$\left[\mu.\frac{d}{dz}+\eta.\frac{d}{dy}+\xi.\frac{d}{dx}\right] I(r,\Omega) = -\alpha(r,\Omega).I(r,\Omega)+\int_{4\pi}\alpha_d(r,\Omega'\rightarrow\Omega).I(r,\Omega').d\Omega'$$

où μ, η et ξ sont les cosinus directeurs respectivement selon les axes (Ox), (Oy) et (Oz), $\alpha(r,\Omega)$ est le coefficient d'extinction dans la direction (Ω) c'est-à-dire la probabilité par unité de longueur pour qu'un photon soit intercepté, et $\alpha_d(r,\Omega'\rightarrow\Omega)$ est la section efficace de diffusion différentielle pour qu'un photon provenant de la direction (Ω') soit diffusé dans un angle solide unité selon la direction (Ω).

	Milieu Continu (mono/multi couches turbides)	Milieu Discontinu (objets opaques, turbides, ...)
Modèles analytiques	Walthall et al. (1985)	
Théorie de Kubelka et Munk	Suits (1972) Verhoef (1984) Gastellu-Etchegorry et al. (1996)	
Solution intégrale	Myneni et al. (1987) Knyazikhin et Marshak (1991) Liang et Strahler (1993)	
Modèles géométriques		Otterman et Weiss (1984) Li et Stralher (1985, 1995)
Modèles discrets et suivi de rayons	Kimes et Kirchner (1982a) Myneni et al. (1991) Gastellu-Etchegorry et al. (1996b) Goudriaan (1977) Cooper et al. (1982)	Kanevski et Ross (1983) Ross et Marshak (1987a) Govaerts et Verstraete (1994)
Radiosité		Borel et al. (1991) Jessel (1993) Cohen et al. (1988)

Tableau 1-1: Principaux types de modèles et de milieu de propagation associés.

Le tableau 1-1 indique quelques exemples de modèles de réflectance en fonction du milieu de propagation et de la méthode mathématique utilisée pour la résolution de l'équation de transfert radiatif. La plupart de ces modèles font l'objet d'une présentation.

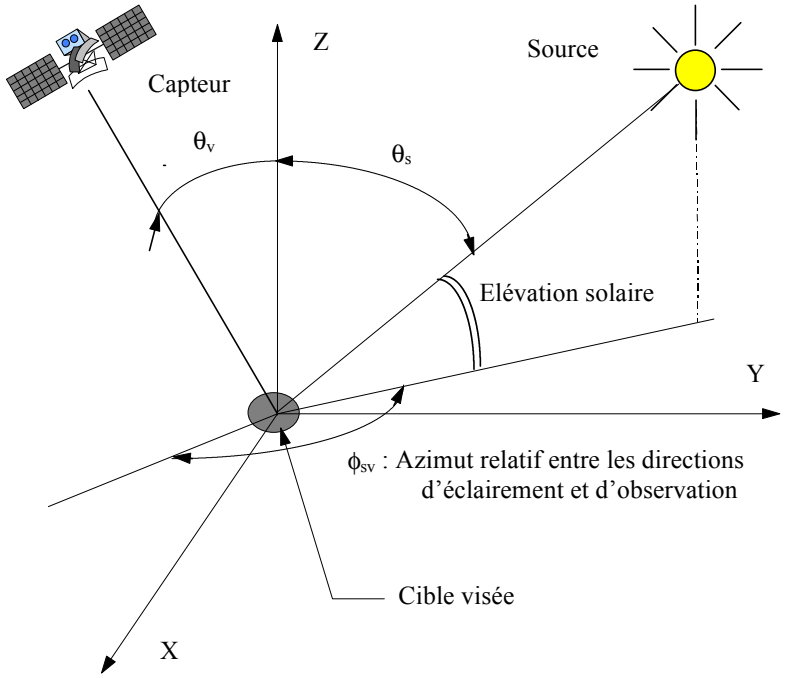


Figure 1-1: Géométrie de l'ensemble « source, cible visée et récepteur».

Dans la suite du texte, la réflectance du couvert est en général notée $R(\Omega_s,\Omega_v)$, où (Ω_s) et (Ω_v) sont les directions d'éclairement et d'observation. Ces directions sont repérées (Fig. 1-1) par leurs angles zénithaux (θ) et azimutaux (ϕ), soit respectivement (θ_s,ϕ_s) et (θ_v,ϕ_v).

II.1. Modèles Analytiques

De nombreux modèles analytiques ont été décrits dans la littérature (Minnaert, 1941 ; Walthall et al., 1985).

Le modèle de Walthall et al. (1985), est souvent utilisé. Il décrit avec une équation simple la réflectance bidirectionnelle $R(\Omega_s,\Omega_v)$ des surfaces terrestres. Ce modèle a été établi à partir de simulations de BRDF de cultures du type soja et maïs effectuées avec le modèle Cupid de Ranson et al. (1983), pour plusieurs configurations zénithales d'illumination et plusieurs indices de végétation (LAI : Leaf Area Index). Les auteurs ont uniquement considéré les domaines spectraux du rouge et de l'infrarouge pour des conditions de ciel relativement claires. L'expression analytique de la réflectance $R(\Omega_s,\Omega_v)$ est:

$$\boxed{R(\Omega_s,\Omega_v) = a.\theta_v^2 + b.\theta_v.\cos(\phi_v - \phi_s) + c}.$$

où a, b, et c sont des coefficients qui minimisent l'erreur quadratique moyenne entre les simulations et les mesures. Cette équation a été validée à l'aide de mesures spectrométriques sur des champs de soja (Ranson et al., 1983).

Le domaine de validité de ce modèle est nécessairement limité. Les coefficients a, b et c dépendent de l'angle zénithal solaire, du rayonnement atmosphérique et du domaine spectral.

II.2. Modèles turbides

Le terme « modèles turbides » est souvent utilisé pour les modèles qui assimilent le milieu de propagation à un milieu mono ou multi-couches infini et composé de petits objets géométriques absorbants et diffusants distribués de manière homogène dans l'espace. La variabilité spatiale du couvert est selon l'axe vertical. Son architecture est décrite par l'indice foliaire ou LAI et la distribution angulaire foliaire ou LAD (Leaf Angular Distribution). La taille des feuilles, les distances entre les feuilles, etc. sont souvent négligées. Ces modèles sont donc plutôt adaptés aux couverts homogènes tels que les cultures, etc.

Trois principales méthodes de résolution mathématique du transfert radiatif sont en général utilisées:

- Approximation du transfert radiatif de Kubelka et Munk avec un système d'équations différentielles régissant un nombre très limité (≤ 5) de flux ascendants et descendants (Suits, 1972 ; Verhoef, 1984 ; Gastellu-Etchegorry et al., 1996).
- Utilisation directe de l'équation du transfert radiatif avec des méthodes intégrales itératives telles que l'approximation des ordres successifs de diffusion (Myneni et al., 1987 ; Knyazikhin et Marshak, 1991), la méthode d'itération de Siedel (Liang et Strahler, 1993), etc.
- Discrétisation de l'espace des directions de propagation avec la méthode des ordonnées discrètes (Myneni et al., 1991). Le transfert radiatif entre couches et entre directions de propagation est alors simulé par un nombre d'équations différentielles égal au nombre de directions discrètes. Ces équations peuvent être résolues à l'aide de méthodes telles que la méthode des différences finies ou des éléments finis, etc.

II.2.1. Méthode de résolution: Approximation de Kubelka et Munk

L'approximation du transfert radiatif de Kubelka et Munk (1931) suppose que:

- le flux diffus est décrit comme la somme de deux flux E^+ et E^-, selon les directions ascendantes et descendantes, perpendiculaires à la surface de symétrie du milieu. Les coefficients d'absorption (α) et de diffusion (σ) caractérisent les variations des flux diffus selon l'axe vertical (Oz). Ces paramètres sont supposés identiques pour E^+ et E^-.
- les flux directs descendant (flux solaire direct) et ascendant sont représentés par les flux F^- et F^+. Leurs variations sont décrites à l'aide de trois paramètres: κ, le coefficient d'absorption, S_1 le coefficient de diffusion hémisphérique vers l'avant et S_2 le coefficient de diffusion hémisphérique vers l'arrière.

Le transfert radiatif des éclairements ascendants et descendants est alors décrit par le système d'équations différentielles suivant:

$$\begin{cases} \dfrac{dE^-(z)}{d(-z)} = -(\alpha+\sigma).E^-(z) + \sigma.E^+(z) + S_1.F^-(z) + S_2.F^+(z) \\ \dfrac{dE^+(z)}{dz} = -(\alpha+\sigma).E^+(z) + \sigma.E^-(z) + S_1.F^+(z) + S_2.F^-(z) \\ \dfrac{dF^-(z)}{d(-z)} = -(\kappa+S_1+S_2).F^-(z) \\ \dfrac{dF^+(z)}{dz} = -(\kappa+S_1+S_2).F^+(z) \end{cases}$$

où l'axe (Oz) est perpendiculaire à la surface de symétrie du milieu et orienté vers le haut. La résolution de ces quatre équations différentielles linéaires permet de déterminer le flux en tout point de la canopée.

Suits (1972) a développé un des premiers modèles turbides à partir de l'approximation de Kubelka et Munk. Il considère la canopée comme une superposition de couches horizontales constituées d'éléments foliaires horizontaux ou verticaux uniformément distribués. Le transfert radiatif est décrit avec trois flux et six paramètres: la réflectance et la transmittance hémisphérique des éléments foliaires ρ_f et τ_f, l'indice foliaire de la canopée LAI, la réflectance hémisphérique du sol ρ_s, la proportion de rayonnement diffus atmosphérique SKYL, et l'angle foliaire moyen calculé à partir de la proportion des feuilles horizontales et verticales.

Le système d'équations différentielles de Kubelka et Munk devient dans ce cas:

$$\begin{cases} \dfrac{dE^-(z)}{dz} = a.E^-(z) + b.E^+(z) + c'.E_s(z) \\ \dfrac{dE^+(z)}{dz} = -a.E^+(z) + b.E^-(z) + c.E_s(z) \\ \dfrac{dE_s(z)}{dz} = k.E_s(z) \\ \dfrac{dE_v(z)}{dz} = u.E^+(z) + v.E^-(z) + w.E_s(z) - K.E_v(z) \end{cases}$$

Les termes $E(z)$, $E^+(z)$, $E_s(z)$ et $E_v(z)$ ont la dimension d'éclairements:

- $E_s(z)$ est l'éclairement d'une surface horizontale à une hauteur z par le rayonnement solaire direct. Ce terme est équivalent au terme $F^-(z)$ de Kubelka et Munk. A z=0, au sommet de la canopée, $E_s(0)$ est équivalent à l'éclairement solaire direct.
- $E^-(z)$ est l'éclairement d'une surface horizontale à une hauteur z par le rayonnement diffus descendant. A z=0, $E^-(0)$ correspond à l'éclairement atmosphérique diffus au sommet de la canopée.
- $E^+(z)$ est l'éclairement d'une surface horizontale à une hauteur z par le rayonnement diffus montant et,
- $E_v(z)$ est l'éclairement d'une surface perpendiculaire à la direction de $\Omega(v)$.

Les coefficients des équations différentielles de Suits et de Kubelka et Munk sont directement liés. Une différence fondamentale entre les deux approches est une meilleure modélisation du rayonnement direct montant (E_v pour Suits et F^+ pour Kubelka et Munk) avec Suits. En effet, les diffusions des rayonnements diffus E^+ et E^- et du rayonnement solaire direct contribuent à $E_v(z)$.

L'hypothèse selon laquelle les feuilles sont orientées uniquement suivant les directions horizontales et verticales, permet un calcul simple de l'ensemble des coefficients des équations différentielles. Une solution itérative est adoptée dans le cas d'une canopée « multi-couche ». Le facteur de réflectance de la canopée est alors donné par:

$$R = \frac{E_v(z=0)}{E_s(z=0) + E^-(z=0)}$$

Différentes améliorations ont été apportées par la suite au modèle de Suits. Tel est le cas en particulier du modèle SAIL (Verhoef, 1984). Ce modèle prend en compte de manière beaucoup plus réaliste la distribution angulaire des éléments foliaires (LAD) dans la canopée. Cette dernière est cependant supposée uniforme et de symétrie azimutale. Les neuf coefficients (a, b, c', c, k, K, u, v, w) d'extinction et de diffusion sont directement calculés avec cette distribution angulaire foliaire.

Le modèle JPF (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) est une amélioration du modèle SAIL. C'est un modèle multi-couche qui simule le transfert radiatif avec un flux montant qui représente l'anisotropie de la réflectance des couches inférieures de la canopée. Il correspond au terme F^+ de l'équation de Kubelka et Munk. La canopée est composée de N couches homogènes où chaque couche i ($1 \leq i \leq N$) est caractérisée par son indice foliaire LAI_i et sa distribution angulaire foliaire LAD_i. Le facteur de réflectance directionnel $R_i(\Omega_v)$ et la réflectance hémisphérique R_i associés à la couche i, sont calculés à partir des réflectances et transmittances hémisphériques des éléments foliaires de la couche i et du facteur de réflectance directionnel $R_{i-1}(\Omega_v)$ des couches inférieures. Les calculs sont effectués de la couche N la plus basse à la couche 1 la plus haute.

II.2.2. Méthode de résolution : Utilisation directe de l'équation du transfert radiatif avec des méthodes intégrales itératives

L'objectif des méthodes itératives (Knyazikhin et Marshak, 1991 ; Cooper et al., 1982 ; Liang et Strahler, 1993) pour la résolution de l'équation du transfert radiatif $\mu.\frac{dI(z,\Omega)}{dz} = -\alpha(z,\Omega).I(z,\Omega) + \int_{4\pi} \alpha_d(z,\Omega' \rightarrow \Omega).I(z,\Omega').d\Omega'$, est de converger le plus rapidement et précisément possible vers la solution. La rapidité de convergence dépend (1) du choix de la valeur initiale $I_0(z,\Omega)$ utilisée et (2) du choix de la méthode intégrale itérative (approximation des ordres successifs de diffusion (Successive Orders of Scattering Approximations (SOSA), méthode de Siedel, etc.). L'efficacité de la méthode utilisée dépend du nombre d'itérations et du nombre de calculs nécessaires par itération.

La méthode SOSA est une des plus simples et des plus anciennes méthodes de résolution des diffusions multiples. Ainsi, la luminance associée à la diffusion d'ordre n est approchée par la somme de n termes d'ordre 1 à n:

$$L_n(z,\Omega) = J_1(z,\Omega) + J_2(z,\Omega) + ... + J_n(z,\Omega).$$

La procédure itérative est donc donnée par:

$$L_{n+1}(z,\Omega) = L_n(z,\Omega) + J_{n+1}(z,\Omega).$$

Les fonctions $J_k(z,\Omega)$ où $k \in [1\ \ n]$, sont les solutions des équations différentielles:

$$\mu.\frac{dJ_k(z,\Omega)}{dz} = \alpha(z,\Omega).J_k(z,\Omega) - R_{k-1}(z,\Omega)$$

où $\begin{cases} J_k(0,\Omega) = 0 \text{ si } \mu > 0 \\ J_k(-H,\Omega) = 0 \text{ si } \mu < 0 \end{cases}$ et $R_0(z,\Omega) = Q(z,\Omega),\ R_k(z,\Omega) = \int_{4\pi} \alpha_d(z,\Omega' \rightarrow \Omega).J_k(z,\Omega').d\Omega'$

avec Q(z,W), le terme d'émission. Les altitudes z = 0 et z = -H correspondent respectivement au sommet et au bas de la canopée. La connaissance de $R_{k-1}(z,\Omega)$ permet de déterminer la solution $J_k(z,\Omega)$ de l'équation du transfert radiatif:

$$J_k(z,\Omega) = \begin{cases} -\frac{1}{\mu}.\int_0^z \exp(\frac{\tau(z',z,\Omega)}{\mu}).R_{k-1}(z',\Omega).dz' & \text{si } \mu > 0 \\ \frac{1}{\mu}.\int_z^{-H} \exp(-\frac{\tau(z',z,\Omega)}{\mu}).R_{k-1}(z',\Omega).dz' & \text{si } \mu < 0 \end{cases}$$

où $\tau(z',z,\Omega) = \int_z^{z'} \sigma(s,\Omega).ds$, l'épaisseur optique de la couche comprise entre les hauteurs z et z', selon la direction (Ω).

Les méthodes intégrales itératives, sont particulièrement intéressantes si le milieu est plus dense et/ou si l'albédo des éléments foliaires est faible. En effet, l'importance des diffusions multiples décroît alors plus rapidement.

II.2.3. Méthode de résolution : Discrétisation de l'espace des directions de propagation avec la méthode des ordonnées discrètes

La méthode des ordonnées discrètes (Ido et de Wit, 1970 ; Myneni et al., 1988) repose sur la discrétisation de l'espace des directions de propagation incidentes et diffuses. Cette méthode n'est pas spécifique aux modèles turbides (Goudriaan, 1977 ; Cooper et al., 1982). Elle est en particulier utilisée avec les modèles discrets et de suivi de rayons (Kimes et Kirchner, 1982a ; Gastellu-Etchegorry et al., 1994 ; Myneni et al., 1988).

Les photons ne peuvent donc se propager que selon un nombre fini de directions, au contraire d'un système de représentation analytique du transport. Cette approximation peut introduire des effets factices inhérents à cette approche. En effet, le nombre de directions retenues doit être suffisamment important pour obtenir des résultats précis et cependant assez faible pour ne pas impliquer des temps de calcul informatique trop importants. Parmi les modèles « multi-couches » développés, le nombre de directions est la plupart du temps inférieur à 10 directions.

L'ensemble des directions de l'espace (4π) étant échantillonné avec un nombre N de directions (Ω_m), où $m \in [1\ N]$, l'équation du transfert radiatif

$$\left[\mu.\frac{d}{dz} + \eta.\frac{d}{dy} + \xi.\frac{d}{dx}\right] I(r,\Omega) = -\alpha(r,\Omega).I(r,\Omega) + \int_{4\pi} \alpha_d(r,\Omega' \rightarrow \Omega).I(r,\Omega').d\Omega'$$

est transformée en une équation discrète telle que:

$$\left[\mu_m \frac{d}{dz} + \eta_m \frac{d}{dy} + \xi_m \frac{d}{dx}\right] I(r,\Omega_m) = -\alpha(r,\Omega_m)\, I(r,\Omega_m) + Q(r,\Omega_m) + \sum_{n=1}^{N} C_n.\alpha_d(r,\Omega_n \rightarrow \Omega_m)\, I(r,\Omega_n)$$

où n et m sont respectivement les indices des directions incidentes et de diffusion, μ_m, η_m et ξ_m sont les cosinus directeurs de la direction (Ω_m) respectivement selon les axes (Ox), (Oy) et (Oz), C_n est le poids associé à la direction incidente (Ω_n) dans le mécanisme de diffusion $(\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$, $Q(r,\Omega_m)$ est le terme d'émission, $\alpha(r,\Omega_m)$ est le coefficient d'extinction dans la direction (Ω_m) et $\alpha_d(r,\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$ est la section efficace de diffusion différentielle.

$I(r,\Omega_m)$ représente soit (1) l'intensité spécifique moyenne dans l'angle solide $\Delta\Omega_n$, c'est-à-dire $\frac{1}{\Delta\Omega_n}.\int_{\Delta\Omega_n} I(r,\Omega).d\Omega$) si $\alpha_d(r,\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$ est le coefficient différentiel moyen de diffusion associé au mécanisme de diffusion du secteur angulaire $\Delta\Omega_n$ vers le secteur angulaire $\Delta\Omega_m$, ou simplement, soit (2) l'intensité spécifique exacte dans la direction (Ω_n) si $\alpha_d(r,\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$ est le coefficient différentiel de diffusion de la direction (Ω_n) vers la direction (Ω_m). Bien évidemment, les valeurs des poids C_n diffèrent en fonction de l'expression de $I(r,\Omega_m)$. Ils peuvent être calculés de manière à satisfaire trois conditions (Myneni et al., 1991) pour le coefficient de diffusion $\alpha_d(r,\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$: positivité, symétrie et conservation de l'énergie.

Les coefficients C_n peuvent être pris égaux aux angles solides $\Delta\Omega_n$ (Gastellu-Etchegorry, 1996b) si (1) $I(r,\Omega_n)$ et $\alpha_d(r,\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$ correspondent à des valeurs moyennes, (2) les angles solides $\Delta\Omega_n$ sont suffisamment petits et, (3) le rayonnement diffusé ne présente pas de trop forte anisotropie. Dans le cas où $I(r,\Omega_n)$ correspond aux valeurs exactes de l'intensité spécifique dans la direction (Ω_n), les valeurs des poids C_n dépendent de l'approche qui est retenue pour calculer l'intégrale $\int_{4\pi} \alpha_d(r,\Omega' \rightarrow \Omega).I(r,\Omega').d\Omega$. L'approche de Gauss-Legendre est très souvent utilisée ; cependant, elle est limitée. En effet, la précision de la solution dépend du nombre et du choix des directions. En présence de fortes anisotropies, les directions doivent être choisies de manière asymétrique, en particulier avec plusieurs directions autour de la ou les anisotropies. Ceci nécessite une connaissance préalable de cette ou ces directions. Une seconde limitation, beaucoup plus contraignante, est liée à la formulation même des ordonnées discrètes. En effet, le rayonnement ne pouvant se propager que selon les N directions prédéfinies (Ω_n), certains objets diffuseurs ou absorbants dans la scène peuvent être ignorés. Le choix de directions espacées régulièrement a tendance à limiter cet effet. De plus, dans le contexte des études de télédétection, il est important d'obtenir une plus grande précision pour les directions proches de la configuration d'observation du capteur, souvent à la verticale, plutôt que pour les directions descendantes. Il convient alors, de choisir une discrétisation angulaire plus fine pour les directions montantes autour de la verticale.

Le modèle de Goudriaan (1977) considère la canopée d'indice foliaire LAI comme une superposition de n couches homogènes. Les radiations se propagent à l'intérieur de la canopée suivant un nombre fini de directions (9 classes zénithales possibles). Ceci est utilisé à la fois pour les radiations montantes (+) et descendantes (-). La variation azimutale des radiations est ignorée. Les équations suivantes sont utilisées pour décrire le transfert de l'intensité spécifique:

$$I^-(k,j+1) = -\alpha(k).I^-(k,j) + 0.5.\omega.B(k).\sum_{i=1}^{9} \frac{LAI}{n}.\frac{G(\theta_k)}{\cos\theta_k}.[I^-(i,j) + I^+(i,j+1)]$$

$$k = 1, \ldots 9$$

$$I^+(k,j) = -\alpha(k).I^+(k,j+1) + 0.5.\omega.B(k).\sum_{i=1}^{9} \frac{LAI}{n}.\frac{G(\theta_k)}{\cos\theta_k}.[I^-(i,j) + I^+(i,j+1)]$$

où $I^-(k,j)$ et $I^+(k,j)$ sont les intensités spécifiques descendantes et montantes selon la direction k dans la sous-couche j ($j \in [1\ \ n]$), ω est la section efficace de diffusion foliaire ($\omega = \rho + \tau$) avec ρ et τ la réflectance et la transmittance hémisphérique foliaire, B(k) représente la distribution angulaire du rayonnement diffusé selon la direction k par une couche, $G(\theta_k)$ est le facteur d'extinction du rayonnement dans la direction k.

Les deux équations précédentes expriment la conservation du flux. Leur résolution est effectuée de manière itérative en assurant la continuité aux limites (sommet de la canopée et sol). Dans le cas d'un rayonnement incident direct, une seule des 9 valeurs directionnelles de l'intensité spécifique est non nulle. Le sol est supposé lambertien. Les radiations sont diffusées selon les 9 classes angulaires.

Les modèles turbides reposent donc sur une hypothèse extrêmement simplificatrice: le milieu de propagation est constitué par des couches planes, infinies et homogènes de petits éléments diffusants et absorbants. Compte tenu de la taille des éléments foliaires et de la structure géométrique du couvert végétal dans la réalité, cette simplification explique que, dans de nombreux cas, la BRDF de couverts est très mal simulée. Ceci est en particulier vrai pour les canopées hétérogènes comme les forêts. Ainsi, les effets d'ombres engendrés par les couronnes ne sont pas modélisés. De plus, avec les modèles basés sur les méthodes intégrales itératives ou la méthode des ordonnées discrètes, le nombre d'itérations pour résoudre l'équation du transfert radiatif dépend en général du milieu et de la méthode de résolution utilisée.

II.3. Modèles géométriques

Les modèles géométriques (Otterman et Weiss, 1984 ; Li et Stralher, 1985 ; Jupp et al., 1986) prennent en compte la structure géométrique du milieu. De ce fait, ils permettent de s'adapter à différentes configurations d'illumination et d'observation. La scène étudiée est constituée d'une surface (sol) de BRDF connue, parsemée d'objets (végétation) de formes simples (cylindres, sphères, etc.) et de propriétés optiques (réflectance, etc.) connues. Les caractéristiques géométriques (taille, distribution spatiale) des objets déterminent la distribution et proportion du sol qui est éclairé. Ces modèles simulent correctement les réflectances des couverts très peu denses, tels que les savanes arbustives, les rangées de cultures largement espacées, etc. où les diffusions multiples entre éléments du paysage peuvent être négligées. Le principe de base de ces modèles est de déterminer les proportions de surfaces éclairées et à l'ombre des différents éléments de la scène. Les calculs sont effectués avec de simples projections géométriques compte tenu des configurations d'éclairement et d'observation.

Le modèle géométrique de Li et Strahler (1985) a été développé à l'origine pour les forêts de conifères ; les couronnes des arbres étant représentées par des cônes. Les paramètres d'entrée du modèle comprennent des paramètres descriptifs de la géométrie de la végétation (hauteur des couronnes h, angle d'ouverture du cône 2α, densité des arbres dans la parcelle, surface de la parcelle S) et de la configuration d'illumination (angle zénithal θ). La distribution des hauteurs et rayons des couronnes suit une loi normale logarithmique ce qui est proche de la réalité. De plus, les couronnes des arbres sont considérées comme des diffuseurs lambertiens totalement opaques.

La figure 1-2 illustre la géométrie d'un houppier de forme conique illuminé avec un angle zénithal solaire θ. Dans le cas où θ est supérieur au demi-angle d'ouverture du cône α, l'ombre du cône est projetée au sol. L'angle γ (Fig. 1-2b) indique la portion de cône illuminée au-delà du demi-cône face au soleil. Il vérifie la relation:

$$\sin \gamma = \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}.$$

En projection verticale, la surface de la couronne éclairée est $(\frac{\pi}{2}+\gamma).r^2$, la surface de la couronne à l'ombre est $(\frac{\pi}{2}-\gamma).r^2$ et la surface du sol à l'ombre de la couronne est $(\cot g\,\gamma - \frac{\pi}{2}+\gamma).r^2$.

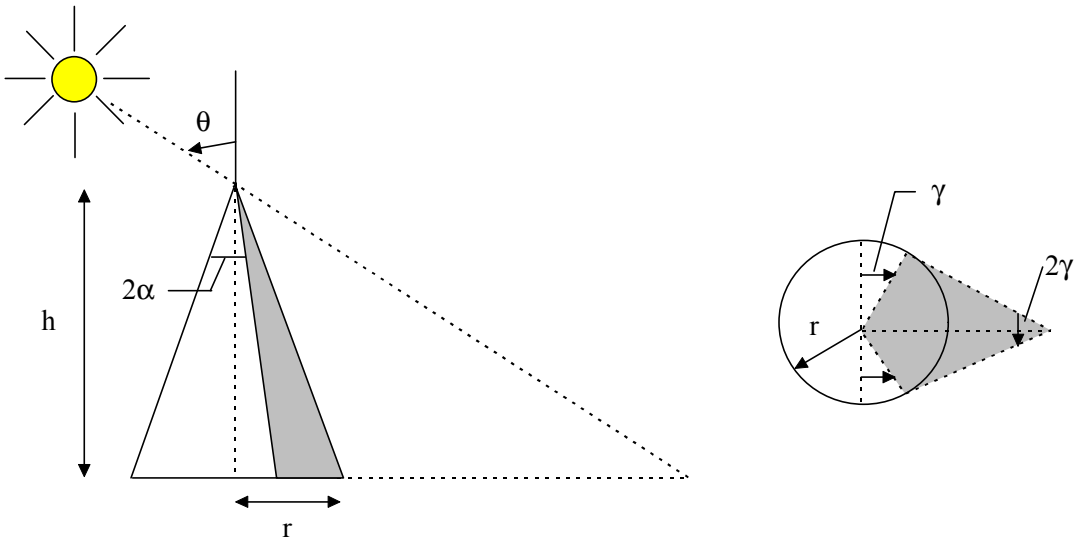


Figure 1-2 : Illumination d'un cône avec le modèle de Li et Stralher (1985). Vue de côté et de dessus.

La réflectance de la scène, pour une visée à la verticale et dans le cas où les couronnes des arbres ne se chevauchent pas, est définie par:

$$R = \frac{S_{sol\ illum} \cdot r_{sol\ illum} + S_{sol\ ombre} \cdot r_{sol\ ombre} + S_{cone\ illum} \cdot r_{cone\ illum} + S_{cone\ ombre} \cdot r_{cone\ ombre}}{S},$$

où $S_{sol\ illum}$, $S_{sol\ ombre}$, $S_{cone\ illum}$ et $S_{cone\ ombre}$ correspondent respectivement aux surfaces de sol éclairé, de sol à l'ombre, de couronne éclairée et de couronne à l'ombre sur toute la parcelle de surface S. $r_{sol\ illum}$, $r_{sol\ ombre}$, $r_{cone\ illum}$ et $r_{cone\ ombre}$ sont les réflectances de chacune de ces surfaces. Les surfaces des quatre composantes de la scène (sol éclairé, sol à l'ombre, couronne éclairée et couronne à l'ombre) varient en fonction des configurations angulaires d'illumination et d'observation.

Le modèle deLi et Strahler (1985)repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices:

- la diffusion atmosphérique est négligée, ce qui limite l'utilisation de ce modèle à des conditions de ciel particulièrement claires,
- la scène est dépourvue de relief,
- les objets géométriques (cônes, sphères, etc.) sont opaques ce qui permet de négliger leur transmittance et,
- les diffusions multiples à l'intérieur et entre les objets sont négligées.

Ces simplifications peuvent induire des erreurs importantes. De plus, les réflectances $r_{sol\ illum}$, $r_{sol\ ombre}$, $r_{cone\ illum}$ et $r_{cone\ ombre}$ doivent être connues a priori ce qui n'est pas toujours possible. Ainsi, dans la plupart de leurs simulations, Li et Strahler (1986) supposent que les réflectances des zones à l'ombre (couronne et sol) sont nulles. Ce modèle ne restitue donc pas fidèlement la BRDF. En effet, dans la réalité, les réflectances des zones à l'ombre ne sont pas

nulles: les couronnes des arbres ne sont pas totalement opaques et une partie du rayonnement incident est transmis par les objets composant la scène. Les diffusions multiples entre les couronnes contribuent également à l'éclairement des zones à l'ombre. Ce modèle est toutefois très utile, de par la simplicité de sa mise en oeuvre, pour évaluer l'influence relative des ombres et par suite, la variance d'images de parcelles forestières acquises par télédétection.

De manière à obtenir des réflectances plus proches de la réalité en particulier pour les zones à l'ombre, Li et Strahler (1988) ont modélisé la transmittance des objets constituant la végétation en prenant en compte leur «semi-opacité».

Dans ce contexte, les auteurs définissent T(θ,s), la probabilité pour qu'un photon traverse sans interception une couronne sur une longueur s, dans la direction θ:

$$T(\theta,s) = e^{-G(\theta).u_f.s}.$$

G(θ) est la section efficace foliaire dans la direction θ par unité de surface foliaire et u_f est la densité volumique foliaire de l'objet-végétation. G(θ) est donnée par la distribution angulaire des éléments foliaires. La longueur s(θ,x,y) de traversée d'un objet est une variable aléatoire qui dépend du point d'arrivée (x,y) du rayon au niveau du sol. Sa moyenne est définie par $\frac{V}{Z.\cos\theta}$, où V est le volume foliaire de la scène et Z.cosθ, la projection orthogonale à θ de la surface de sol à l'ombre des couronnes.

La probabilité pour qu'un photon qui traverse un cône soit transmis sans interception, est:

$$T(\theta) = \int_0^{\infty} p(s).e^{-G(\theta).u_f.s}.ds.$$

p(s) est la densité de probabilité d'avoir une longueur de traversée de la couronne égale à s(θ,x,y). De manière à se ramener à un cas simple pour le calcul de p(s), les auteurs ont supposé que les arbres sont distribués dans la parcelle selon une loi de Poisson. De plus, ils ont distingué deux cas: (1) absence d'intersection entre les couronnes ou intersection avec cumul des densités foliaires ou, (2) intersection des couronnes sans cumul des densités foliaires. Les calculs qui suivent correspondent au premier cas. p(s) est alors évaluée à partir du nombre de couronnes traversées, de la forme géométrique des couronnes et du point d'arrivée au sol du rayon. Pour cela, les auteurs ont défini deux probabilités supplémentaires: P(n), la probabilité de traverser n houppiers et p(s|n), la densité de probabilité que le trajet dans les couronnes soit s sachant que n couronnes sont traversées. La probabilité p(s|n) est un produit de convolution

$$p(s|n) = p(s_1|1) \otimes p(s_2|1) \otimes ... \otimes p(s_i|1) \otimes ... \otimes p(s_n|1),$$

s étant égal à $s = \sum_{i=1}^{n} s_i$, où s_i est la longueur de traversée de chaque couronne et $p(s_i|1)$ correspondant à la densité de probabilité pour que la longueur de traversée de une couronne soit égale à s_i. De plus, les arbres étant distribués dans la parcelle selon une loi de Poisson, la probabilité P(n) suit également une loi de Poisson de moyenne λ.Z, où λ est la densité des houppiers dans la parcelle. p(s) est défini par:

$$p(s) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n).p(s|n).$$

La transmission T(θ) du rayonnement dans la direction θ est donc:

$$T(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) . \int_{0}^{\infty} p(s|n) . e^{-G(\theta).u_f.s} . ds$$

Le calcul de T(θ) demande une connaissance préalable de la densité de probabilité p(s|1). Cette dernière a été évaluée (Li et Stralher, 1988) de manière analytique pour différentes formes géométriques de houppiers, telles que la sphère, l'ellipsoïde ou encore le cône. Dans le cas d'un houppier de forme sphérique, $p(s|1) = \frac{s}{2.R^2}$, où $s \in [0\ 2R]$ avec R le rayon de la sphère. Elle varie donc entre 0 et $\frac{1}{R}$ pour respectivement s égal à 0 et 2R.

Par rapport au modèle de Li et Stralher (1985), l'introduction de la transmission (Li et Stralher, 1995) à travers les houppiers diminue le contraste entre les surfaces directement illuminées et les surfaces à l'ombre. Cependant, le calcul de T(θ) repose sur des hypothèses simplificatrices. Ainsi, les centres des arbres sont distribués dans la parcelle selon une loi de Poisson. Une telle distribution des arbres n'est pas toujours réalisée (Tomppo, 1986), en particulier dans le cas des plantations où une distance minimale doit être respectée entre chaque arbre, ou dans le cas d'une distribution des arbres « en bouquets » (« clustered distribution »). De plus, la distribution des longueurs de traversée s a été évaluée pour des formes simples de houppiers. Des techniques informatiques comme le lancer de rayon avec la méthode de Monté-Carlo permettent d'évaluer cette quantité pour tout type de houppier. Elles sont cependant beaucoup plus lourdes à mettre en oeuvre car elles ne reposent pas sur des expressions analytiques de s.

La non prise en compte de la diffusion atmosphérique et des diffusions multiples entre et à l'intérieur des couronnes est aussi une importante source potentielle d'erreur au niveau du calcul de la BRDF. Ces limitations induisent des erreurs au niveau du calcul de la BRDF. Ainsi, Gastellu-Etchegorry et al. (1996), ont évalué l'importance relative des diffusions multiples par rapport aux diffusions d'ordre 1: les diffusions multiples sont d'autant plus importantes que l'indice foliaire est grand et que l'albédo foliaire est élevé. Dans le cas d'un houppier d'indice foliaire égal à 2 et pour une albédo foliaire de 0.9, ce qui correspond en première approximation au domaine spectral du proche infrarouge, le rapport entre le flux énergétique lié aux diffusions multiples et celui lié aux diffusions simples atteint 63%.

L'intérêt des modèles géométriques est donc essentiellement qualitatif. Ils montrent l'influence relative de la scène (densité d'arbre, architecture, etc.) et des configurations d'illumination et d'observation sur le calcul de la BRDF.

Les modèles dits « hybrides » représentent une extension des modèles géométriques. La canopée est toujours considérée comme une distribution de « protubérances » géométriques composés d'éléments foliaires diffusants et absorbants. Ces modèles prennent plus ou moins en compte la transmittance et les diffusions multiples (Li et Stralher, 1995).

Ainsi, Li et Stralher (1995) ont amélioré le modèle géométrique de Li et Stralher (1985) avec l'ajout des diffusions foliaires simples et multiples du rayonnement solaire dans la direction de visée. La diffusion d'ordre 1 dans la direction de visée est proportionnelle à une exponentielle négative fonction du chemin parcouru par les rayons incidents dans les couronnes. Elle est de plus, proportionnelle au trajet effectué par le rayon pour sortir des couronnes. Ce rayonnement diffusé une fois puis, de nouveau intercepté par d'autres couronnes, donne lieu à des diffusions d'ordre 2 et ainsi de suite. Ce modèle est un bon

exemple de modèle « hybride ». La modélisation des diffusions multiples est cependant relativement approximative.

II.4. Modèles discrets et suivi de rayons

Les modèles « discrets » (Kimes et Kirchner, 1982a ; Gastellu-Etchegorry et al., 1994 ; Myneni et al., 1989a,b) ou « de suivi de rayons » (Kanevski et Ross, 1983 ; Ross et Marshak, 1987a ; Govaerts et Verstraete, 1994) permettent de simuler le transfert radiatif dans des milieux quelconques (milieu turbide, distribution discrète de surfaces ou de volumes diffusants opaques ou non, découpage de la scène en cellules élémentaires, etc.). Les scènes sont en général réalisées avec des logiciels spécifiques, appelés « modeleurs » (Pinel et al., 1995 et cf. Chap.2). Les objets qui composent la scène sont simulés de façon plus ou moins complexe selon les modèles, à l'aide d'association de « primitives ». Ces dernières sont des éléments géométriques simples comme des disques, des sphères, des cylindres, etc. dont les propriétés optiques sont connues. La canopée peut être ainsi simulée de manière très réaliste.

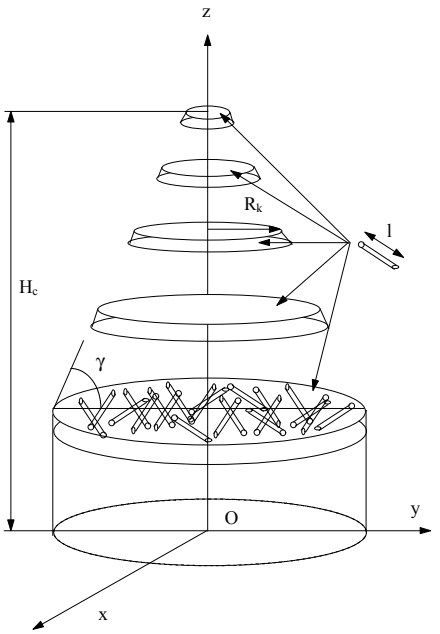


Figure 1-3: Représentation d'un conifère avec le modèle de Kanevski and Ross(1983).

Ainsi, le modèle de Kanevski et Ross (1983) modélise le transfert radiatif dans un conifère simulé avec grande précision. La couronne du conifère (Fig. 1-3) est représentée par un cône de hauteur H_c et d'angle de base γ, constitué par la superposition de n_c disques horizontaux. Le rayon du $k^{ième}$ disque est donné par $R_k = \frac{(n_c - k - 1)}{n_c} . \frac{\tan\gamma}{H_c}$, avec $k \in [1\ n_c]$.
Les rameaux sont les plus petits éléments de végétation simulés. Ils sont représentés par des cylindres de hauteur l, de rayon r et d'albédo simple ω_λ. L'indice foliaire de l'arbre dépend du nombre moyen β de rameaux par unité de surface de disque. L'orientation angulaire des rameaux est aléatoire et leur distribution spatiale suit à l'intérieur d'un disque une loi de Poisson.

Les modèles discrets reposent sur une double discrétisation: (1) discrétisation de l'espace des directions de propagation qui permet de limiter le nombre de directions à considérer au niveau des équations différentielles qui régissent le transfert radiatif et (2) discrétisation de la scène en cellules élémentaires.

Les modèles qui utilisent la technique de suivi de rayons (« ray-tracing ») ne nécessitent pas une discrétisation du milieu de propagation. Les surfaces ou les volumes qui composent la scène peuvent être distribués de manière quelconque. Ces modèles assurent un suivi exact des trajets lumineux, contrairement aux modèles discrets pour lesquels les trajets sont définis de manière non continue par les coordonnées des cellules traversées.

Les modèles discrets et de suivi de rayons présentent de nombreuses similitudes. Ainsi, tous deux simulent le transfert radiatif à partir de traitements locaux qui dépendent des éléments localement présents et de leurs caractéristiques biophysiques et optiques. Le rayonnement incident est simulé à partir d'un nombre fini de rayons uniformément distribués au sommet de la scène. Ces rayons sont tous parallèles si l'éclairement est seulement dû au rayonnement solaire direct.

Suite à l'interception d'un flux incident, la diffusion est simulée à partir des propriétés optiques des éléments de la scène, en considérant l'ensemble des directions de diffusion possibles (Kimes et Kirchner, 1982a ; Gastellu-Etchegorry et al., 1996 ; Myneni, 1989 a,b) ou bien en choisissant de manière aléatoire une direction de propagation, compte tenu de la probabilité associée à chaque direction de diffusion (méthode de « Monté-Carlo », (Govaerts et Verstraete, 1994)). Ainsi, pour chaque rayon incident, le modèle prédit la collision suivante entre le rayon considéré et un objet de la scène. Pour cela, le modèle teste, compte tenu de la configuration angulaire du rayonnement incident et la géométrie des objets dans la scène, avec quels objets l'interaction est possible. Cette procédure est très coûteuse au niveau des temps calcul en particulier si le nombre d'éléments dans la scène et le nombre de rayons incidents sont élevés. C'est pourquoi, depuis quelques années, certains modèles (Govaerts et Verstraete, 1994) utilisent des algorithmes d'optimisation. La méthode des « boites englobantes » est un exemple d'algorithme d'optimisation. La scène est divisée en « gros pavés » eux-mêmes sous divisés en cellules de plus petites dimensions, appelées « voxels ». A chaque voxel est associé la liste des éléments partiellement ou totalement contenus dans celui-ci. Ainsi, lorsqu'un rayon pénètre dans un voxel, le modèle teste la possibilité d'interaction avec uniquement les objets. Cette approche diminue fortement les temps de calcul.

Les modèles discrets ou de suivi de rayons permettent généralement de prédire deux types d'information: (1) le régime radiatif dans la scène (calcul du rayonnement absorbé, etc.) et (2) la fonction de réflectance bidirectionnelle de la scène.

Exemple:

Dans le modèle de Govaerts et Verstraete (1994), le calcul de la BRDF est effectué en divisant le demi-hémisphère au-dessus de la scène en n surfaces élémentaires égales S. Le facteur de réflectance R d'une surface élémentaire est calculé au moyen de la formule:

$$R = \frac{\pi . E_l}{N . \Delta\Omega_l}, \; l \in [1\; n] \;,$$

où E_l est le nombre de photons qui ont traversé la surface élémentaire S_l en quittant la scène, N est le nombre total de photons incidents et $\Delta\Omega_l$ est l'angle solide projeté correspondant à la surface élémentaire.

II.4.1. Les modèles «discrets»

Le modèle de Myneni et al. (1989a,b) considère que l'espace est constitué de cellules de coordonnées centrales (x_i,y_j,z_k) régulièrement réparties. i, j et k appartiennent respectivement aux intervalles [0 I], [0 J] et [0 K] où I, J, et K sont le nombre de cellules selon les directions (Ox), (Oy) et (Oz). Les dimensions des cellules sont Δx, Δy et Δz selon les axes (Ox), (Oy) et (Oz). Les coefficients d'extinction α et de diffusion α_d sont des fonctions discrètes dont les valeurs sont constantes à l'intérieur d'une cellule. Ces valeurs peuvent toutefois varier d'une cellule à l'autre. Pour une cellule (x_i,y_j,z_k), ces fonctions sont notées α_{ijk} et α_{dijk}. La maille d'échantillonnage doit en fait être adaptée à la variabilité spatiale de ces quantités.

Plusieurs méthodes telles que la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis, permettent de résoudre les équations aux ordonnées discrètes. La méthode des différences finies est présentée ci dessous. Les directions discrètes sont choisies de manière à vérifier les trois conditions de positivité, de symétrie et d'équilibre énergétique. n et m sont respectivement les indices des directions incidentes et de diffusion, μ_m, η_m et ξ_m sont les cosinus directeurs de la direction (Ω_m) respectivement selon les axes (Ox), (Oy) et (Oz), C_n est le poids associé à la direction incidente (Ω_n) dans le mécanisme de diffusion $(\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$, $Q(r,\Omega_m)$ est le terme d'émission, $\alpha(r,\Omega_m)$ est le coefficient d'extinction dans la direction (Ω_m) et $\alpha_d(r,\Omega_n \rightarrow \Omega_m)$ est la section efficace de diffusion différentielle.

L'approximation des dérivées spatiales de l'équation

$$\left[\mu_m.\frac{d}{dz}+\eta_m.\frac{d}{dy}+\xi_m.\frac{d}{dx}\right].I(r,\Omega_m)=-\alpha(r,\Omega_m).I(r,\Omega_m)+Q(r,\Omega_m)+\sum_{n=1}^{N}C_n.\alpha_d(r,\Omega_n\rightarrow\Omega_m).I(r,\Omega_n)$$

combinée à l'intégration sur l'ensemble de la cellule donne:

$$\mu_m.\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}dy.\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}}dx.\left[I_m(x,y,z_{k-\frac{1}{2}})-I_m(x,y,z_{k+\frac{1}{2}})\right]+\eta_m.\int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}dy.\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}}dx.\left[I_m(x,y_{k-\frac{1}{2}},z)-I_m(x,y_{k+\frac{1}{2}},z)\right]$$
$$+\xi_m.\int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}dz.\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}dy.\left[I_m(x_{k-\frac{1}{2}},y,z)-I_m(x_{k+\frac{1}{2}},y,z)\right]+\alpha_{mijk}.\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}}dx.\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}dy.\int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}dz.I_m(x,y,z)$$
$$=\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}}dx.\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}dy.\int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}dz.J_m(x,y,z)$$

Les directions sont repérées par l'indice m et le terme source est représenté par J_m. La division des termes de cette équation par le volume $(\Delta x.\Delta y.\Delta z)$ de la cellule donne:

$$\frac{m}{\Delta z}.\left[I_{mij}(z_{k-\frac{1}{2}})-I_{mij}(z_{k+\frac{1}{2}})\right]+\frac{m}{\Delta y}.\left[I_{mik}(y_{k-\frac{1}{2}})-I_{mik}(y_{k+\frac{1}{2}})\right]$$
$$+\frac{m}{\Delta x}.\left[I_{mjk}(x_{k-\frac{1}{2}})-I_{mjk}(x_{k+\frac{1}{2}},y,z)\right]+\quad_{mijk}.I_{mijk}=J_{mijk}$$

Les intensités spécifiques moyennes sur les faces de la cellule (x_i,y_j,z_k) sont:

$$I_{mij}(z_{k\pm\frac{1}{2}}) = \frac{1}{\Delta x.\Delta y}\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} dy.\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} dx.\, I_m(x,y,z_{k\pm\frac{1}{2}})$$

$$I_{mik}(y_{j\pm\frac{1}{2}}) = \frac{1}{\Delta x.\Delta z}\int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} dz.\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} dx.\, I_m(x,y_{j\pm\frac{1}{2}},z)$$

$$I_{mjk}(x_{i\pm\frac{1}{2}}) = \frac{1}{\Delta y.\Delta z}\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} dy.\int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} dz.\, I_{mj}(x_{i\pm\frac{1}{2}},y,z)$$

De même, les moyennes volumiques de l'intensité spécifique et du terme source sont:

$$I_{mijk} = \frac{1}{\Delta x.\Delta y.\Delta z}\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} dx.\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} dy.\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} dx.\, I_m(x,y,z)$$

$$J_{mijk} = \frac{1}{\Delta x.\Delta y.\Delta z}\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} dx.\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} dy.\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} dx.\, J_m(x,y,z)$$

De façon à trouver l'intensité spécifique moyenne I_{mijk} ainsi que les flux qui sortent par les trois faces de la cellule, il convient de définir trois équations supplémentaires. Les flux des photons qui rentrent par les autres trois faces de la cellule sont connus soit en tant que conditions aux limites soit à partir des calculs précédents. Les relations suivantes relient les intensités spécifiques des bords de la cellule à la valeur au centre de la cellule. Ces relations simples peuvent cependant induire des intensités négatives.

$$I_{mijk} \approx \frac{1}{2}.\left[I_{mij}(z_{k+\frac{1}{2}}) + I_{mij}(z_{k-\frac{1}{2}})\right]$$

$$I_{mijk} \approx \frac{1}{2}.\left[I_{mik}(y_{j+\frac{1}{2}}) + I_{mik}(y_{j-\frac{1}{2}})\right]$$

$$I_{mijk} \approx \frac{1}{2}.\left[I_{mjk}(x_{k+\frac{1}{2}}) + I_{mjk}(x_{k-\frac{1}{2}})\right]$$

Les flux entrant et sortant sont identifiés par les signes des cosinus directeurs. Les trois dernières relations permettent d'exprimer les flux sortant en fonction des flux entrant dans l'expression de l'intensité moyenne au centre de la cellule. Leur utilisation avec l'équation du transfert radiatif donne:

$$I_{mijk} = \frac{J_{mijk} + \frac{2.|\mu_n|}{\Delta z}.I_{mij}(z_{k\pm\frac{1}{2}}) + \frac{2.|\eta_n|}{\Delta y}.I_{mik}(y_{j\pm\frac{1}{2}}) + \frac{2.|\xi_n|}{\Delta x}.I_{mjk}(x_{i\pm\frac{1}{2}})}{\alpha_{nijk} + \frac{2.|\mu_n|}{\Delta z} + \frac{2.|\eta_n|}{\Delta y} + \frac{2.|\xi_n|}{\Delta x}}$$

Les trois termes $I_{mij}(z_{k-\frac{1}{2}})$, $I_{mik}(y_{j-\frac{1}{2}})$ et $I_{mjk}(x_{i-\frac{1}{2}})$ au numérateur sont les intensités spécifiques entrant dans la cellule (i,j,k). La valeur de L_{nijk} permet alors de calculer les trois intensités spécifiques sortant $I_{mij}(z_{k+\frac{1}{2}})$, $I_{mik}(y_{j+\frac{1}{2}})$ et $I_{mjk}(x_{i+\frac{1}{2}})$. Ce calcul est réalisé par itération sur toutes les cellules et toutes les directions discrètes de l'espace.

Une limitation majeure de ce modèle concerne la résolution de la grille. En effet, celle-ci doit être suffisamment fine pour que les variations des paramètres à l'intérieur d'une cellule soient négligeables. Ceci est une forte contrainte dans le cas de milieux de grandes dimensions. De plus, les flux qui sortent des cellules peuvent être négatifs. En effet, dans la réalité la valeur du flux au centre de la cellule, ne correspond pas à la valeur moyenne du flux entre les faces d'entrée et de sortie des cellules. Une autre limitation de ce modèle concerne l'échantillonnage optimal des directions. Ainsi, la discrétisation de l'espace avec un nombre insuffisant de directions peut impliquer la non prise en compte de certaines sources ou diffuseurs, et donc des erreurs. Cependant, un nombre trop important de directions à tendance à augmenter les temps de calculs. Une autre limitation de ce modèle provient de la non prise en compte des mécanismes de rétrodiffusion.

Le modèle K-K de Kimes et Kirchner (1982a) simule le transfert radiatif dans des couverts hétérogènes. Il constitue un exemple de modèle discret. La scène est assimilée à une matrice 3-D de cellules élémentaires cubiques associées à des informations concernant le type d'éléments contenu dans la cellule (Fig. 1-4). La structure du couvert est ainsi simplement représentée par l'arrangement spatial des cellules. Les cellules foliaires sont constituées par un milieu turbide. Elles sont caractérisées par des paramètres biophysiques (densité foliaire, distribution angulaire des éléments foliaires, etc.) et optiques (réflectance et transmittance hémisphériques des éléments foliaires, etc.). Les flux se propagent dans la scène selon un nombre discret de directions distribuées de manière régulière. Le modèle simule le transfert radiatif dans un paysage infini constitué par la juxtaposition de scènes identiques à la scène simulée. En effet, pour tout rayon qui sort de la scène selon la direction (Ω) par une face latérale, un rayon de même énergie entre dans la scène par une cellule symétrique à la cellule de sortie, selon la direction (Ω).

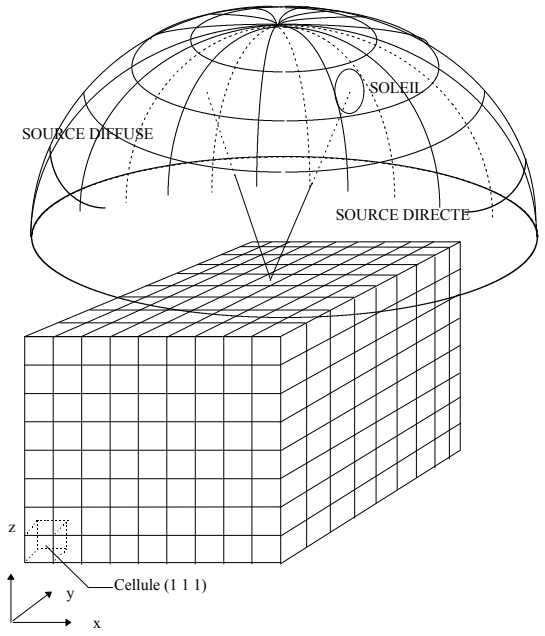


Figure 1-4: Représentation de la scène (matrice 3-D de cellules élémentaires) et des sources d'illumination atmosphérique et solaire avec le modèle de Kimes et Kirchner (1982a).

La phase d'illumination de la scène comprend deux étapes: l'illumination par le rayonnement solaire direct puis par le rayonnement atmosphérique diffus. Des rayons partent de toutes les cellules de la couche supérieure dans la direction solaire pour simuler le flux solaire et dans toutes les autres directions descendantes pour simuler l'éclairement diffus. Les rayons sont alors suivis dans leur propagation au sein de la scène. Pour chaque cellule traversée, une partie du rayonnement incident est transmise et une partie est interceptée. La proportion de rayonnement transmis par des cellules de type «éléments foliaires» est:

$$\boxed{T(\Delta l, \Omega_s) = \exp(-G(\Omega_s).u_f.\Delta l)},$$

où Δl est le trajet du rayon incident dans la cellule, u_f est la densité foliaire de la cellule et $G(\Omega_s)$ le facteur d'extinction du rayonnement dans la direction incidente (Ω_s).

La proportion de flux intercepté, $[1-T(\Delta l,\Omega_s)]$, donne lieu à des sources secondaires. La proportion de flux à diffuser est $[1-T(\Delta l,\Omega_s)].\omega_f$, où ω_f est l'albédo de la cellule éclairée dans la direction (Ω_s). Cet albédo dépend bien évidemment des propriétés optiques (réflectance ρ et transmittance τ) des éléments foliaires. Dans le cas où le modèle de réflectance foliaire est bi-lambertien, l'albédo correspond à la somme: $\omega_f = \rho + \tau$. La proportion d'énergie à diffuser $T(\Omega_s, \Omega_v)$ selon la direction (Ω_v) est donc donnée par:

$$\boxed{T(\Omega_s, \Omega_v) = [1 - T(\Delta l, \Omega_s)].\frac{P(\Omega_s, \Omega_v)}{4}},$$

où $\dfrac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi} = \dfrac{\int_{2\pi} \dfrac{g_f(\Omega_f)}{2\pi}.\left|\Omega_s.\Omega_f\right|.f(\Omega_s \rightarrow \Omega_v, \Omega_f).d\Omega_f}{G(\Omega_s)}$ avec $\int_{4\pi} \dfrac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}.d\Omega_v = \omega_f$.

$\dfrac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}$ est la fonction de transfert foliaire, $\dfrac{g_f(j, \Omega_f)}{2\pi}$ est la fonction de distribution normalisée des directions foliaires et $f(\Omega_s \rightarrow \Omega_v, \Omega_f)$ correspond à la fonction de phase des éléments foliaires. Les flux diffus repartent du centre des cellules. Les diffusions multiples à l'intérieur de chaque cellule sont complètement négligées. Le modèle itère ainsi, sur les cellules de la scène et sur les ordres de diffusion. La procédure s'arrête quand les sources n'ont plus d'énergie à diffuser ou que cette énergie est inférieure à un seuil fixé par l'utilisateur ; cela signifie que l'ensemble du rayonnement a été absorbé et/ou réfléchi par le couvert. Le modèle permet de calculer: (1) la proportion de rayonnement absorbé par chaque cellule ou par la totalité de la scène, (2) la réflectance directionnelle de tout ou partie de la scène, (3) le facteur de réflectance hémisphérique de la scène.

Ce modèle est adapté aux milieux hétérogènes. Cependant, il présente de sérieuses limitations liées à des hypothèses simplificatrices. Ainsi, les diffusions multiples à l'intérieur des cellules élémentaires sont complètement négligées. De plus, la propagation du rayonnement dans la scène est toujours simulée à partir du centre des cellules. Cette simplification peut conduire à des erreurs très importantes en particulier pour l'évaluation des flux diffusés par des cellules de fortes densités foliaires. Cette limitation est très restrictive pour les études de télédétection. En effet, la biomasse foliaire des cellules doit pouvoir être suffisamment large pour permettre l'étude de scènes de grandes dimensions.

De plus, l'hypothèse selon laquelle le modèle ne permet pas d'avoir des cellules parallélipipédiques mais uniquement cubiques est également une sérieuse contrainte. En effet,

dans le cas de scènes de grandes dimensions, il est intéressant que la discrétisation de la direction verticale soit beaucoup plus fine que dans les directions horizontales.

Une autre limitation du modèle provient du fait que les directions de propagation des flux dans la maquette sont équidistantes. Cette distribution n'est en fait pas optimale, à la fois dans le cas des milieux homogènes où une distribution de Gauss-Legendre serait plus adéquate (Myneni, 1990) et dans le cas de milieux hétérogènes où elle conduit à un sous-échantillonnage des directions particulières comme le nadir, la direction de rétrodiffusion ou la direction spéculaire. D'une manière générale, il est intéressant de pouvoir sélectionner les directions qui permettent de rendre compte de l'anisotropie des milieux étudiés. Toutefois, une distribution régulière est intéressante dans le cas de milieux anisotropes selon des directions non définies *a priori*.

Les autres limitations de ce modèle proviennent de la non prise en compte de la rétrodiffusion (hot-spot), des réflexions spéculaires foliaires, de la polarisation du rayonnement, de la topographie et de la BRDF des sols.

II.4.2. Modèles basés sur le suivi de rayons combiné à la méthode de Monté-Carlo

La méthode de Monté-Carlo est utilisée dans les modèles de suivi de rayons pour sélectionner des mécanismes physiques (nature d'une interaction: absorption, diffusion, etc.) selon leur probabilité d'apparition (Govaerts et Verstraete, 1994) ou pour obtenir une description statistique du trajet des photons lumineux à l'intérieur du milieu étudié (Kanevski et Ross, 1983 ; Ross et Marshak, 1987a). Toute interaction d'un photon ne donne lieu qu'à un mécanisme d'absorption ou de diffusion d'un seul photon. Un photon peut être cependant diffusé dans toutes les directions. La détermination du comportement moyen d'une population de photons nécessite un nombre important de photons (en général, de l'ordre de 10^7).

Cette méthode comprend trois étapes majeures (Ross et Marshak, 1988):

1. Génération d'un nombre aléatoire u uniformément distribué dans [0 1] .
2. Calcul de la probabilité d'apparition d'un mécanisme physique en fonction de u,
3. Choix du mécanisme physique selon sa probabilité calculée à l'étape 2.

Ainsi, le modèle de Govaerts et Verstraete (1994) détermine la nature d'une interaction à partir de la génération de nombres aléatoires u uniformément distribués entre [0 1]:

- si $u \leq \rho$, le type d'interaction est la réflection,
- si $\rho < u \leq \rho+\tau$, le type d'interaction est la transmission,
- si $\rho+\tau < u$, le type d'interaction est l'absorption.

Le modèle de Ross et Marshak (1984) combine également le suivi de rayon et la méthode de Monté-Carlo. Il considère les éléments foliaires comme des surfaces elliptiques lambertiennes dont les normales sont uniformément distribuées. Après chaque collision, la nouvelle direction de propagation (θ_v ϕ_v) d'un photon est donnée par $\theta_v = \arcsin(\sqrt{u})$ et $\phi_v = 2\pi v$ où u et v sont des nombres aléatoires uniformément distribués entre [0 1].

La contrainte principale des modèles discrets et de suivi de rayons est le temps de calcul des simulations. Ceux-ci sont directement liés à la complexité de la scène (nombre et disposition des objets dans la scène) et par conséquent au nombre de photons nécessaires pour obtenir des résultats fiables (problème du sur-échantillonnage des rayons). De plus, l'utilisation de la méthode de Monté-Carlo avec les modèles de type « suivi de rayons »

contribue à augmenter les temps de calcul. En effet, cette méthode statistique nécessite un nombre important de « tirages au sort » pour la sélection des mécanismes physiques. En contre partie, ces modèles offrent une simulation réaliste des interactions entre les ondes électromagnétiqueset le couvert végétal.

II.5. Modèles basés sur la radiosité

La méthode de la radiosité a été développée à l'origine afin d'étudier les échanges radiatifs thermiques entre éléments de surface. Par la suite, cette méthode a été adaptée à d'autres domaines spectraux, en particulier dans le cadre de la synthèse d'images. Elle permet de décrire la diffusion de la lumière entre surfaces réfléchissantes lambertiennes. Cette description passe par la détermination de tous les angles solides sous lesquels tous les éléments de surface d'un milieu se voient entre eux. Cette méthode nécessite le calcul de facteurs géométriques appelés « facteurs de forme », qui correspondent à la fraction d'énergie issue d'une surface i et qui atteint une surface j. Une fois ces facteurs de forme connus, les temps calcul sont relativement courts même si les conditions d'éclairement et d'observation sont variables; la géométrie du couvert restant bien évidemment la même.

Le problème majeur de cette approche est le calcul de tous les facteurs de forme combiné aux besoins en mémoire pour les stocker (Borel et al., 1991). En effet, le nombre de calculs est proportionnel à N^2, où N est le nombre de surfaces constituant l'environnement. Ces problèmes de stockage et de temps calcul sont minimisés avec la radiosité dite « progressive » (Jessel, 1993): il n'est plus alors nécessaire de stocker en mémoire tous les facteurs d'angle. Ces derniers sont introduits de manière progressive.

II.5.1. Radiosité classique

La théorie de la radiosité classique simule l'équilibre énergétique dans un univers fermé composé d'éléments de surface réfléchissants. Ces éléments de surfaces sont en général supposés lambertiens. Ils peuvent représenter des surfaces ou des volumes. On appelle radiosité B d'une surface, le flux total par unité de surface issu de celle-ci (W/m^2). Elle comprend donc l'énergie transmise, l'énergie thermique émise et l'énergie diffusée ; l'émission thermique sera négligée ici étant donné que nous nous intéressons au domaine spectral du visible et du proche infrarouge. La diffusion d'une surface comprend les diffusions d'ordre un et multiples des éléments surfaciques ou volumiques représentés par la surface.

Ainsi, pour une surface dS de luminance $L(\Omega)$, le flux énergétique δ^2W (unité: W) émis dans un angle solide $d\Omega$ faisant un angle θ avec la normale de la surface dS est:

$$\delta^2W = L(\Omega).dS.\cos\theta.d\Omega \qquad (W)$$

La radiosité de dS est $$dB = \frac{\delta^2 W}{dS} = L(\Omega).\cos\theta.d\Omega \qquad (W/m^2)$$

Si l'élément de surface dS est un diffuseur lambertien, alors:

$$B = \int_{2\pi} L(\Omega).\cos\theta.d\Omega = L.\int_{2\pi} \cos\theta.d\Omega = \pi.L$$

Équation de la radiosité:

Soient deux surfaces infinitésimales dS_i et dS_j, de luminances L_i et L_j, et distantes de r_{ij} avec $i \neq j$. $d\Omega_{i\to j}$ est l'angle solide sous lequel la surface différentielle dS_i voit dS_j:

$$d\Omega_{i\to j} = \frac{dS_j . \cos\theta_j}{r_{ij}^2} .$$

Le flux énergétique de dS_j vers dS_i est:

$$\delta^2 W_{dS_j\to dS_i} = \frac{L_j . hid. \cos\theta_i . dS_i . \cos\theta_j . dS_j}{r_{ij}^2} = B_j . \frac{hid. \cos\theta_i . \cos\theta_j . dS_i}{\pi . r_{ij}^2} . dS_j .$$

$\delta^2 W_{dS_j\to dS_i}$ est de la forme :

$$\delta^2 W_{dS_j\to dS_i} = B_j . hid. F_{dS_j\to dS_i} . dS_j$$

avec $F_{dS_j\to dS_i} = \frac{\cos\theta_i . \cos\theta_j . dS_i}{\pi . r_{ij}^2}$, le « facteur de forme » pour des éléments de surfaces infinitésimaux. L'appellation « facteur de forme » se justifie par le fait que la valeur de $F_{dS_j\to dS_i}$ ne dépend que de la forme et de la position des objets les uns par rapport aux autres. C'est en quelque sorte un angle solide efficace de diffusion. Le terme hid est un indice de visibilité :

$$hid = \begin{cases} 1 \text{ si la surface } dS_j \text{ est totalement visible de } dS_i \\ 0 \text{ sinon} \end{cases},$$

c'est-à-dire:

$$hid = \begin{cases} 1 \text{ si } \vec{n}_i . \vec{u}_{ij} > 0 \text{ et } \vec{n}_j . \vec{u}_{ji} > 0 \\ 0 \text{ si } \vec{n}_i . \vec{n}_j > 0 \end{cases},$$

$\vec{n}_i$ et $\vec{n}_j$ étant respectivement les normales aux éléments de surfaces i et j et $\vec{u}_{ij}$ et $\vec{u}_{ji}$ les vecteurs unités dans les directions de visée de la surface i vers la surface j et inversement.

La règle de réciprocité « $dS_i . F_{dS_i\to dS_j} = dS_j . F_{dS_j\to dS_i}$ » peut être utilisée pour représenter les flux de dS_i vers dS_j et de dS_j vers dS_i seulement si dS_i et dS_j sont lambertiens.

L'énergie reçue par la surface dS_i en provenance de N surfaces S_j est:

$$\sum_{j=1}^{N} \int_{S_j} d^2 W_{dS_j\to dS_i} = \sum_{j=1}^{N} \int_{S_j} B_j . hid. \frac{\cos\theta_i . \cos\theta_j}{\pi . r_{ij}^2} . dS_i . dS_j = \sum_{j=1}^{N} B_j . hid. F_{dS_i\to S_j} . dS_i \quad \text{avec } i \neq j$$

L'émittance d'une surface infinitésimale dS_i est donc:

$$B_i = E_i + \chi_i . \sum_{j=1}^{N} \left(\int_{S_j} B_j . hid. \frac{\cos\theta_i . \cos\theta_j}{\pi . r_{ij}^2} . dS_j \right) = E_i + \chi_i . \sum_{j=1}^{N} \left(\int_{S_j} B_j . hid. F_{dS_i\to S_j} \right) \quad \text{avec } i \neq j$$

où E_i est l'émittance de S_i due à la diffusion d'ordre 1 du rayonnement d'une source externe.

$$\chi_i = \begin{cases} \rho_i \text{ si } \vec{n}_i . \vec{u}_{ji} < 0 \\ \tau_i \text{ si } \vec{n}_i . \vec{u}_{ji} > 0 \end{cases}.$$

ρ_i et τ_i sont respectivement la réflectance et la transmittance hémisphériques de dS_i, si la surface est supposée bi-lambertienne. $\vec{n}_i$ est la normale de la surface i et $\vec{u}_{ji}$ est le vecteur unitaire dirigé de S_j vers S_i.

L'intégration sur la surface S_i permet de déterminer l'énergie issue de S_i

$$\int_{S_i} B_i . dS_i = \int_{S_i} E_i . dS_i + \int_{S_i} (\chi_i . \sum_{j=1}^{N} (\int_{S_j} B_j . hid . \frac{\cos\theta_i . \cos\theta_j}{\pi . r_{ij}^2} . dS_j)) . dS_i \quad \text{avec } i \neq j$$

Si B_i et E_i sont constants sur S_i et S_j et si χ_i est constant sur S_i, on obtient l'équation de la radiosité:

$$B_i = E_i + \chi_i . \sum_{j=1}^{N} B_j . F_{S_i \to S_j} \text{ avec } F_{S_i \to S_j} = \frac{1}{S_i} . \int_{S_j} \int_{S_j} hid . \frac{\cos\theta_i . \cos\theta_j}{\pi . r_{ij}^2} . dS_j . dS_i \quad \text{avec } i \neq j$$

Le « facteur de forme $F_{S_i \to S_j}$ » est la moyenne des facteurs de forme $F_{dS_i \to S_j}$. Cette moyenne est pondérée par hid pour tenir compte de la présence d'objets entre S_i et S_j.

L'équation de la radiosité $B_i = E_i + \chi_i . \sum_{j=1}^{N} B_j . F_{S_i \to S_j}$ constitue un système de N équations à N inconnues. Sous forme matricielle, on obtient:

$$\begin{pmatrix} 1-\chi_1.F_{11} & -\chi_1.F_{12} & -\chi_1.F_{13} & \dots & -\chi_1.F_{1N} \\ -\chi_2.F_{21} & 1-\chi_2.F_{22} & -\chi_2.F_{23} & \dots & -\chi_2.F_{2N} \\ -\chi_3.F_{31} & -\chi_3.F_{32} & 1-\chi_3.F_{33} & \dots & -\chi_3.F_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\chi_N.F_{N1} & -\chi_N.F_{N2} & -\chi_N.F_{N3} & \dots & 1-\chi_N.F_{NN} \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \dots \\ B_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \dots \\ E_N \end{pmatrix},$$

soit une équation $[A].[B]=[E]$, où la matrice $[A]$ est la « matrice de radiosité».

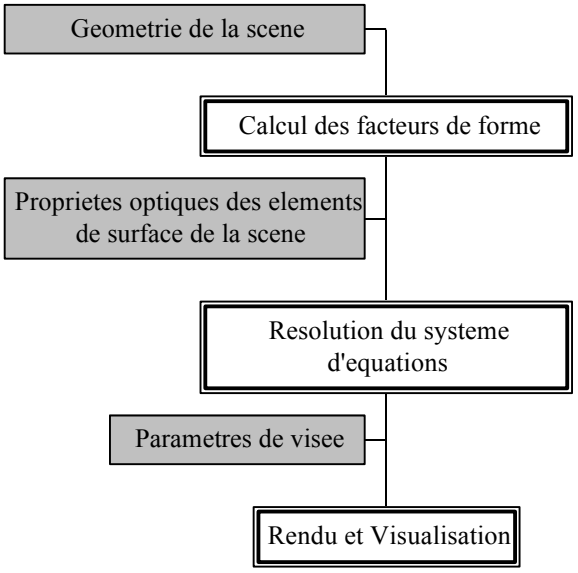


Figure 1-5:
Organigramme de la méthode de la radiosité.

Toute implémentation d'un modèle de radiosité requiert les étapes suivantes:

- Génération de la scène 3-D: Chaque surface est repérée par sa position, sa forme, son orientation et ses propriétés optiques.
- Calcul des termes d'émission E_i dus à une source externe. Ici, l'émission thermique est négligée.

- Calcul des facteurs de forme avec par exemple la méthode de la sphère de Nusselt (Siegel et Howell, 1978), de l'hémi-cube (Cohen et Greenberg, 1985) ou analytique (Sparrow, 1963 ; Grossetie et al., 1991).
- Résolution du système d'équations de la radiosité avec par exemple la méthode de Gauss-Siedel (Goral et al., 1984).
- Rendu de la scène: les surfaces directement visibles depuis le point d'observation sont déterminées, compte tenu des paramètres de visée.

Les modèles basés sur la radiosité classique sont très attractifs car ils prennent en compte la géométrie de la scène et permettent la création d'images de simulation. Cependant, ils sont sujets à d'importantes contraintes:

- les éléments de surface qui constituent la scène sont lambertiens ; la modélisation des flux spéculaires n'est pas prise en compte.
- la création d'une scène est complexe car elle doit être très complète (position et normales des surfaces, etc.).
- les méthodes géométriques de détermination des « facteurs de forme » (Méthode de la sphère de Nusselt, méthode de l'hémi-cube, etc.) sont basées sur de nombreuses simplifications géométriques et nécessitent des temps calculs élevés. L'évaluation analytique des facteurs de forme est difficile même pour des configurations géométriques simples.
- le stockage des facteurs de forme nécessite des espaces mémoires très importants même si le volume nécessaire peut être réduit en considérant que de nombreux facteurs de forme sont nuls (occlusion entre deux surfaces).
- les temps de calcul sont très importants.

II.5.2. Radiosité progressive

La radiosité progressive (Cohen et al., 1988 ; Jessel, 1993) a été développée pour diminuer certaines contraintes liées à la radiosité classique. Elle est basée sur une reformulation de l'algorithme de la radiosité classique. C'est une méthode itérative de résolution du système d'équations de la radiosité: seuls les facteurs de forme associés aux éléments susceptibles d'influencer l'observation considérée sont pris en compte. Les facteurs de forme ne sont plus pré-calculés et stockés en mémoire mais calculés au fur et à mesure des besoins au cours du traitement afin d'éviter des temps de calcul trop importants. Les éléments de surface utilisés sont introduits dans l'ordre décroissant de leur contribution énergétique. Au début du calcul de l'illumination, tous les éléments ont une énergie nulle excepté les sources lumineuses. Cette approche permet de réduire l'espace mémoire nécessaire. La radiosité progressive est aussi appelée « approche du rendu par affinages successifs ». Cette méthode permet à chaque itération de mettre à jour les radiosités de tous les éléments en fonction de la radiosité d'un élément particulier. Les temps de production des images sont cette fois-ci proportionnels à N, le nombre de surfaces élémentaires dans la scène et non plus comme dans la radiosité classique proportionnel à N^2.

La contribution énergétique d'une surface j à une surface i étant $\chi_i . B_j . F_{S_i \to S_j}$, la contribution énergétique de la surface i vers toute surface j est:

$$\chi_j . B_i . F_{S_j \to S_i} = \chi_j . B_i . F_{S_i \to S_j} . \frac{S_i}{S_j}$$

compte tenu de la relation de réciprocité des facteurs de forme $F_{S_j \to S_i} = F_{S_i \to S_j} . \frac{S_i}{S_j}$. La radiosité de la surface j peut-être ainsi mise à jour. Le simple calcul du facteur de forme $F_{S_i \to S_j}$ permet par la relation de réciprocité de déduire tous les facteurs de forme $F_{S_j \to S_i}$, ce qui diminue beaucoup les temps de calcul. Les radiosités de toutes les surface S_j sont mises à jour simultanément, cette procédure étant répétée pour les N surfaces S_i présentes dans une première itération. Au cours des itérations successives, l'estimation de la radiosité de chaque surface i sera de plus en plus précise. Au cours des itérations successives, seule la différence ΔB_i entre la radiosité de l'itération courante et de l'itération précédente est calculée. Le nombre de calculs est fonction du seuil de tolérance ε pour la convergence de la solution. En effet, les calculs sont effectués dans le cas où $\Delta B_i \leq \varepsilon$. Le fait de traiter les surfaces en fonction de leur contribution énergétique décroissante permet d'approcher plus rapidement la solution finale.

III. CONCLUSION DU CHAPITRE I^ER

Face à la diversité des modèles de réflectance, il est important de bien connaître les objectifs scientifiques de l'étude menée pour choisir le modèle de réflectance le plus adapté. La complexité d'un modèle tel que les modèles discrets et de suivi de rayons ou encore les modèles basés sur la théorie de la radiosité, n'est peut-être pas toujours utile pour toutes les études. Plusieurs critères peuvent être appréciés pour choisir le modèle le plus adéquat:

- le degré de précision pour la représentation du milieu de propagation: Les modèles turbides sont adaptés aux milieux mono/multi-couches et les modèles géométriques ou discrets permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du milieu. Cependant, ces derniers nécessitent des modèles (« modeleur ») de représentation de la scène.
- la rapidité désirée pour obtenir le résultat: Dans le cas des modèles turbides, les temps de calcul dépendent directement de la méthode de résolution de l'équation du transfert radiatif. Avec les modèles discrets, les temps de calcul des simulations sont proportionnels au nombre d'objets dans la scène et à la complexité des propriétés physiques des objets. Ces temps sont donc souvent très élevés bien que ceux-ci aient tendance à diminuer du fait de l'évolution rapide de la technologie informatique.
- le volume de données et de ce fait les moyens informatiques nécessaires pour effectuer une simulation: Les modèles discrets nécessitent par exemple des besoins en mémoire vive relativement importants (plusieurs Mega-octets) pour stocker les informations relatives au milieu. Dans le cas des modèles basés sur la méthode de la radiosité, il est de plus nécessaire de stocker les facteurs de forme.

En fonction de l'étude menée, la sélection du modèle de réflectance peut être également guidée par deux autres critères:

- la possibilité et la facilité de coupler le modèle de réflectance avec un autre modèle tel que les modèles atmosphériques ou les modèles de fonctionnement foliaire,
- la possibilité et la facilité d'inverser le modèle dans le but d'estimer certains paramètres biophysiques ou biochimiques caractéristiques de la végétation.

CHAPITRE 2

LE MODÈLE DART

I. THEORIE DU MODELE DART

L'étude bibliographique précédente a fait apparaître les limitations des modèles existants. En effet, appliqués à des scènes compatibles avec les études par télédétection, c'est à dire comprenant un nombre important d'éléments diffusants, ils ne permettent pas à la fois de prendre en compte de manière réaliste l'architecture du couvert et de simuler avec précision le transfert radiatif. Dans ce contexte, nous avons développé un modèle, appelé DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) qui minimise ces limitations (Gastellu-Etchegorry et al., 1994). Ce modèle correspond à une extension et une combinaison de plusieurs modèles: Kimes and Krichner (1982a), Kuusk (1985), Myneni (1990), Vanderbilt et al. (1985), etc.

I.1. Approche du modèle DART

Les principaux fondements du modèle DART sont résumés ci-dessous:

I.1.1. Discrétisation de l'espace

La scène, c'est à dire le paysage, est représentée par la juxtaposition de cellules élémentaires parallélipipédiques. Les dimensions de ces cellules élémentaires Δx, Δy, Δz suivant les axes (Ox), (Oy), (Oz) ne sont pas forcément égales. Les nombres de cellules suivant les axes verticaux et horizontaux sont donc indépendants. Le nombre de cellules élémentaires N_{cell} est donné par $N_{cell} = \frac{\Delta X.\Delta Y.\Delta Z}{\Delta x.\Delta y.\Delta z}$, où ΔX, ΔY, ΔZ sont les dimensions de la parcelle respectivement suivant les axes (Ox), (Oy) et (Oz). Chaque cellule élémentaire est repérée dans la scène par les coordonnées entières (x, y, z) de son centre. Par convention, les cellules de la couche la plus basse dans la maquette sont repérées par z=0 et les cellules de la couche la plus haute par $z = \left(\frac{\Delta Z}{\Delta z} - 1 \right)$. Le paysage représenté est de l'ordre de l'hectare. La dimension des cellules élémentaires varie entre 10 m et 1 m.

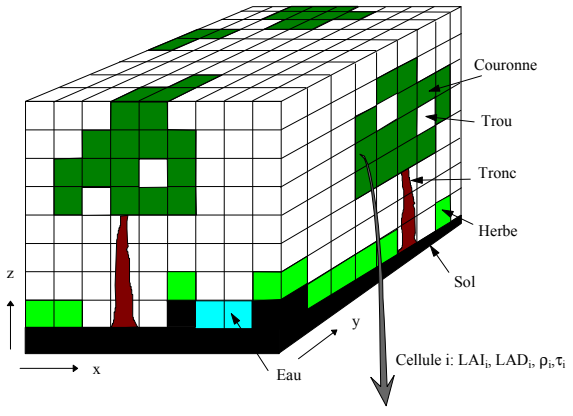


Figure 2-1: Représentation de la matrice 3-D de cellules élémentaires avec le modèle DART

I.1.2. Type des cellules élémentaires

Chaque cellule élémentaire est représentative d'un type j d'élément qui peut être du sol, de l'herbe, du tronc, de l'eau, des feuilles ou du vide. Les cellules « sol » peuvent correspondre soit à du sol nu soit à une combinaison de sol et d'éléments foliaires.

Les mécanismes d'interactions qui prennent naissance au sein de ces cellules dépendent de leur nature. Ainsi, les cellules de type « éléments foliaires » qui constituent le

sous-bois ou les couronnes des arbres sont considérées comme un milieu turbide où prennent naissance des mécanismes d'interactions volumiques. Elles sont assimilées à un « nuage homogène » de feuilles. Par contre, les cellules « sol » et « eau » sont considérées comme un milieu solide où ne surviennent que des interactions de surface. Les cellules « tronc » sont traitées comme un milieu semi-opaque ; l'opacité de la cellule dépend du volume occupé par le tronc.

Chaque cellule est caractérisée par des propriétés optiques et parfois structurales spécifiques (Tableau 2-1). Les propriétés optiques des cellules jouent un rôle primordial au cours du transfert radiatif dans la scène. L'utilisation du modèle DART pour des milieux de propriétés optiques quelconques a conduit à utiliser des représentations précalculées de ces dernières. Ainsi, les cellules « éléments foliaires » sont caractérisées par (1) une fonction de diffusion volumique $T(j,\Omega,\Omega')$ qui caractérise les mécanismes de diffusions dans la cellule, (2) une fonction de transmittance $T(j,\Omega)$ qui caractérise les mécanismes de transmission du rayonnement incident et (3) un paramètre structural qui représente la surface foliaire dans la cellule ; l'indice j indique la nature de la cellule. Les codes des six types sont : Vide = 0, Sol = 1, Sous-bois = 2, Tronc = 3, Éléments foliaires de la canopée = 4, Eau = 5. Par la suite, les fonctions $T(j,\Omega,\Omega')$ et $T(j,\Omega)$ sont souvent simplement appelés «fonctions de transfert».

La fonction $T(j,\Omega,\Omega')$ représente la proportion d'énergie diffusée par un élément de volume foliaire dans un cône angulaire ($\Delta\Omega'$) de direction centrale (Ω') par rapport à l'énergie interceptée par cet élément de volume et incidente selon la direction (Ω). La fonction de transmittance $T(j,\Omega)$ représente la proportion d'énergie transmise par unité de déplacement selon la direction (Ω) par un élément de volume de densité foliaire unité.

Le tableau 2-1 résume la nature des mécanismes d'interactions associée aux différents types de cellules ainsi que les quantités physiques utilisées pour décrire leurs propriétés optiques.

Type cellule	Caractéristiques	Type d'interactions
Sol Sol + Herbe Eau	Fonction de transfert: $T(j,\Omega)$	milieu opaque $\Rightarrow$ interaction surfacique
Feuille	Densité foliaire: u_f + Fonctions de transfert: $T(j,\Omega)$ et $T(j,\Omega,\Omega')$	milieu turbide $\Rightarrow$ interaction volumique
Tronc	ρ_{tronc} + dbh	milieu semi-opaque

Tableau 2-1: Caractéristiques physiques nécessaires pour la description des mécanismes d'interactions des différents types de cellules avec le modèle DART. dbh est le diamètre du tronc à 1.30 m du sol.

I.1.3. Simulation d'un paysage infini

L'approche de Kimes et Kirchner (1982a), a été adoptée pour simuler le comportement radiométrique d'un paysage infini. Ce dernier est supposé être la juxtaposition de motifs identiques si bien que la simulation d'un seul motif, ici appelé « scène », permet de simuler l'ensemble du paysage. Ainsi, tout rayon lumineux qui sort de la maquette par une face verticale en un point donné est réintroduit dans la maquette en un

point symétrique. La taille du motif dépend des caractéristiques géométriques du paysage. Elle peut être faible (1 arbre, 4 arbres, etc.) pour une plantation régulière et élevée pour un couvert arboré sans structure géométrique particulière.

I.1.4. Discrétisation des directions de propagation du rayonnement

L'espace des directions (Ω_n) de propagation du rayonnement est discrétisé en N secteurs angulaires $\Delta\Omega_n$ contigus, selon la méthode des « ordonnées discrètes » (Myneni, 1990). Les directions centrales de ces secteurs angulaires correspondent aux directions « incidentes » et « diffuses » des flux énergétiques se propageant dans la maquette. Elles ne sont pas nécessairement équidistantes mais sont fixées par l'opérateur.

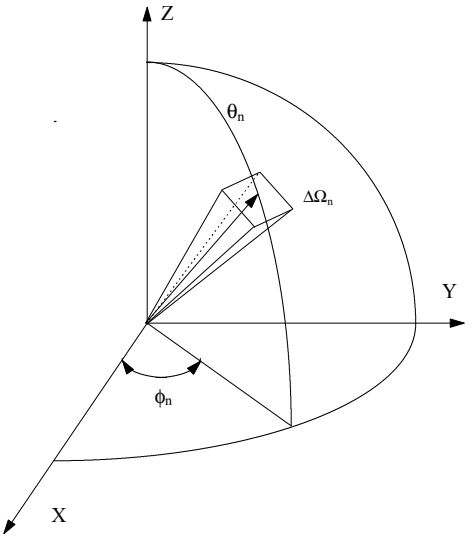


Figure 2-2 : Exemple d'un angle solide $_n$ et de sa direction centrale d'angles zénithal $_n$ et azimutal $_n$.

L'angle solide $\Delta\Omega_n$ défini par les intervalles zénithaux $\Delta\theta_n$ et azimutaux $\Delta\phi_n$ et selon la direction (θ_n,ϕ_n) est:

$$\Delta\Omega_n = \int_{\Delta\phi_n}\int_{\Delta\theta_n} |d\mu|.d\phi \text{ où } \mu = \cos\theta \quad \text{avec} \sum_{n=1}^{N} \Delta\Omega_n = 4\pi \ .$$

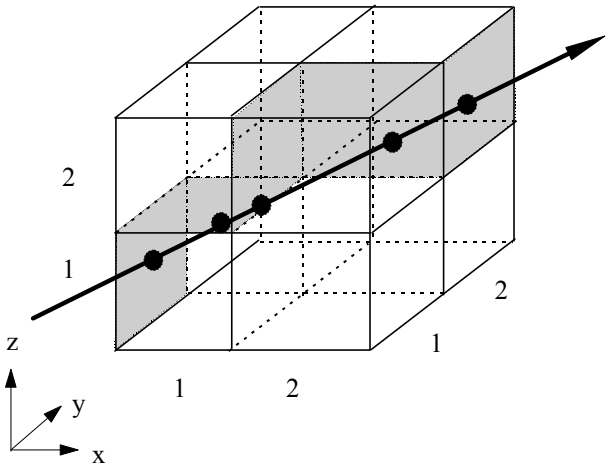


Figure 2-3: Schématisation de la traversée d'un rayon dans une matrice de dimension 2 2 2. Les surfaces grisées correspondent aux faces des cellules traversées. Le rayon traverse les cellules (1 1 1), (1 1 2), (2 1 2) et (2 2 2).

Pour chaque direction (Ω_n) de propagation du rayonnement et de manière à éviter des calculs répétitifs pendant la phase de traitement, le modèle DART calcule et stocke dans une phase préliminaire, la suite des cellules traversées par un rayon issu du centre de la cellule et du centre des faces de la cellule (0, 0, 0) ainsi que la longueur de traversée Δl_i et

les coordonnées du point d'entrée de toutes ces cellules. Dans la suite des traitements, la propagation du rayonnement se fait toujours de manière géométrique à partir du centre des cellules pour les milieux turbides et à partir du centre des faces pour les milieux solides.

A partir de ces données stockées en mémoire, il est facile de trouver les coordonnées d'une $i^{ème}$ cellule traversée par un rayon se propageant dans la scène selon une direction (Ω_n) depuis une cellule (cellule « origine » du rayon) de coordonnées (x_o,y_o,z_o). Les coordonnées de cette $i^{ème}$ cellule correspondent aux coordonnées de la cellule « origine » du rayon ajoutées aux coordonnées de la $i^{ème}$ cellule du rayon issu du centre ou d'une face de la cellule (0,0,0).

Les points développés ci-dessus correspondent aux principaux fondements du modèle DART. La discrétisation de l'espace en cellules élémentaires offre la possibilité de représenter un paysage en fonction de l'échelle d'analyse souhaitée. La gestion des types de cellules permet de simuler les mécanismes physiques de manière satisfaisante comme nous le verrons par la suite. La possibilité de simuler un paysage infini périodique diminue dans de nombreux cas les contraintes informatiques et les problèmes de conditions aux limites. Enfin, la discrétisation des directions de propagation du rayonnement simplifie le suivi des flux énergétiques dans la scène.

I.2. Élaboration de scènes complexes

Le modèle DART peut fonctionner avec des scènes quelconques, c'est à dire n'importe quel arrangement spatial de cellules « sol », « herbe », « feuille », « tronc », « sol + herbe » et « eau ». La création de scènes, aussi appelées « maquette informatiques », est évidemment un préalable au fonctionnement du modèle DART. D'une manière générale, la création de maquettes doit pouvoir être réalisée à la fois simplement et rapidement. Ceci est en particulier vrai s'il est envisagé de réaliser avec DART des études qui nécessitent la création de nombreuses maquettes. La non prise en compte de cet aspect peut induire une grande difficulté d'utilisation des modèles de transfert radiatif, indépendamment de la qualité de ceux-ci. Ainsi, le modèle de Myneni (Myneni, 1990), actuellement un des modèles les plus performants, nécessite une construction « manuelle » de la scène, cellule par cellule.

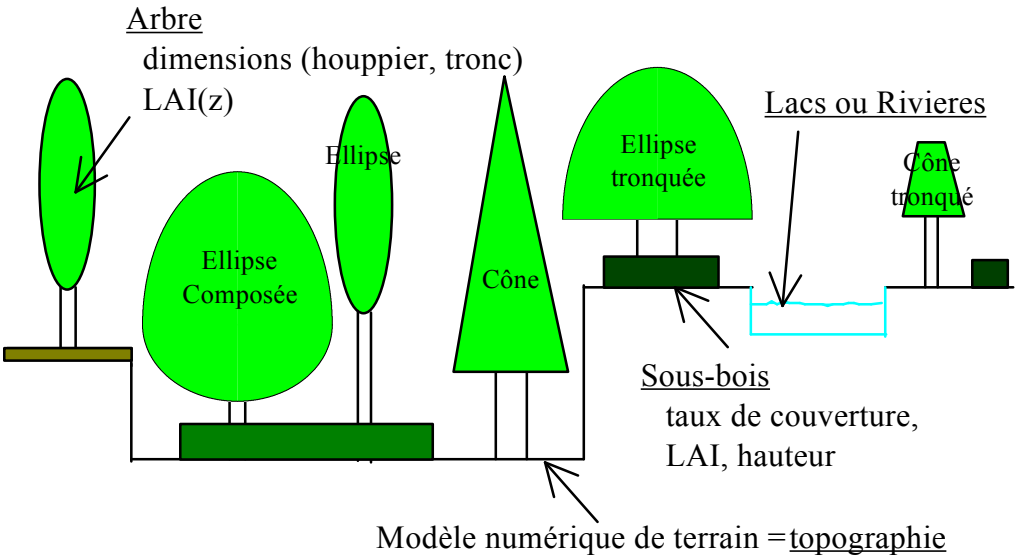


Figure 2-4: Représentation schématique des éléments simulés par le programme de création des maquettes. Les arbres peuvent être distribués de manière aléatoire, en rangées ou en bosquets.

Un effort particulier a donc été consacré à l'élaboration d'un outil efficace pour la construction de scènes. L'objectif n'était pas de créer des scènes aussi réalistes que dans le domaine de la synthèse d'images mais simplement de développer un outil adapté à nos travaux scientifiques. Les scènes créées doivent permettre de simuler de manière précise le transfert radiatif dans les couverts aux échelles d'analyse de la télédétection. Le programme développé pour la simulation des scènes, est particulièrement adapté aux milieux hétérogènes tels que les couverts arborés. Il permet d'une part de construire la matrice 3-D de cellules élémentaires et d'autre part, de calculer les fonctions de transfert des différents éléments qui constituent la scène. Nous nous intéresserons dans ce paragraphe à la construction géométrique de la scène.

Les couverts forestiers sont schématiquement représentés à partir de trois niveaux verticaux: un niveau associé au sol, un niveau associé au sous-bois et un dernier niveau associé à la canopée (Fig. 2-4). Nous allons donc détailler ces différents niveaux et expliquer les procédures utilisées pour les représenter:

- Niveau 1 → le sol:

Les couches inférieures de toutes les maquettes correspondent à des cellules « sol ». L'agencement vertical et horizontal des cellules du sol permet de simuler en première approximation, la topographie de la scène. La création d'un sol plan correspond à une couche homogène de cellules de type « sol ». Le relief ne pouvant être simulé par des plans inclinés, il est simulé de manière discrète avec des pas plus ou moins grossiers suivant la dimension prédéfinie des cellules élémentaires. L'information sur le relief est donnée par un fichier « raster » du type « Modèle Numérique de Terrain ». Les comptes numériques de ce fichier indiquent l'altitude du sol. Les comptes numériques extrêmes correspondent aux altitudes minimales et maximales de la scène.

- Niveau 1 (facultatif) → les surfaces d'eaux:

Le logiciel permet également d'introduire des surfaces d'eau. Les cellules « sol » correspondant à l'interface sol-air sont alors remplacées par des cellules « eau ». Ces surfaces peuvent prendre deux formes: les surfaces ouvertes comme les rivières et les surfaces fermées comme les lacs.

⇒ Lac: Un lac est représenté par une surface elliptique. Sa position est repérée par les coordonnées du centre de l'ellipse et ses dimensions sont indiquées par les dimensions des axes de l'ellipse. Les axes sont parallèles aux axes (Ox) et (Oy) de la maquette.

⇒ Rivière: La forme des rivières est simulée au moyen de polynômes de degré n ; n=1 permet de créer une rivière rectiligne, n>1 permet de simuler les méandres d'un fleuve. La largeur de la rivière est constante sur toute la scène. Il est également possible de ne représenter qu'un tronçon de rivière en définissant des limites inférieures et supérieures selon l'axe (Ox).

La végétation inondée peut être simulée. Elle correspond à des cellules « tronc » et « feuilles » au dessus de cellules « eau ». Ce cas est intéressant pour simuler des paysages tels que des zones de mangroves ou des rizières.

- Niveau 2 → le sous-bois:

Le sous-bois peut être modélisé par une ou plusieurs couches homogènes, ou par une distribution spatiale hétérogène de cellules foliaires. Plusieurs types de sous-bois peuvent être implantés dans la maquette. Ils se différencient par leurs caractéristiques optiques

(cf. §.I.1.2) et leurs zones d'implantation. De même que les cellules « feuille » de la canopée, les cellules « feuille » du sous-bois sont représentées par un milieu turbide d'éléments foliaires.

Le sous-bois est défini par une hauteur moyenne H_{herbe} et un écart-type σ_{Hherbe} sur cette hauteur. Dans le cas d'un sous-bois homogène c'est à dire à hauteur constante, l'écart-type sur la hauteur est fixé à 0. Dans le cas où l'écart-type n'est pas nul, la hauteur du sous-bois est distribuée selon une loi normale dans l'intervalle [$H-2.\sigma_{Hherbe}$ $H+2.\sigma_{Hherbe}$]. Dans le cas d'une hauteur négative, la hauteur est ramenée à 0.

On associe également au sous-bois deux paramètres structuraux qui sont l'indice foliaire LAI_{herbe} qui correspond à la surface foliaire par surface unité de sol et la distribution angulaire foliaire LAD_{herbe}.

L'indice foliaire (unité: m^2/m^2) et la densité foliaire $u_{f\text{-}herbe}$ (unité: $m^2/m^3 \equiv m^{-1}$) des cellules « sous-bois » sont liés:

$$u_{f\text{-}herbe} = \frac{LAI_{herbe}}{H_{herbe}(x,y)},$$

où $H_{herbe}(x,y)$ est à la hauteur locale de l'herbe en (x,y). Dans le cas d'un sous-bois de hauteur constante sur la parcelle, la densité foliaire est identique pour toutes les cellules « sous-bois ». Dans le cas d'un sous-bois spatialement hétérogène (hauteur non constante), la densité foliaire $u_{f\text{-}herbe}$ est constante pour toutes les cellules associées à une même position (x,y) mais varie d'un couple (x,y) à une autre en fonction de la hauteur locale. Le LAI du sous-bois reste par conséquent constant sur la parcelle.

Le logiciel de gestion des maquettes propose 6 distributions angulaires foliaires classiques: uniforme, sphérique, érectophile, planophile, extrémophile et plagiophile. De nouvelles distributions peuvent être introduites facilement par l'utilisateur.

- Niveau 3 → la canopée:

Les arbres sont regroupés par espèce. Une espèce se différencie d'une autre par une ou plusieurs caractéristiques géométriques ou optiques différentes. Du point de vue géométrique, les arbres sont modélisés par un tronc vertical et une couronne représentée par différentes formes géométriques.

⇒ <u>Tronc</u>:

La hauteur du tronc est définie par une valeur moyenne H_{tronc} et un écart-type σ_{Htronc}. Les hauteurs simulées varient entre (H_{tronc}-2.σ_{Htronc}) et (H_{tronc}+2.σ_{Htronc}) selon une loi normale. La hauteur H_{tronc} correspond à la mesure entre le sol et le bas de la couronne. Les cellules de « tronc » apparaissent à partir du niveau du sol si le sous-bois est inexistant sinon au-dessus du sous-bois. Cette simplification a été adaptée car, du point de vue du transfert radiatif, la contribution de l'herbe est en général plus forte que celle du tronc. Les diamètres des troncs sont définis par une valeur moyenne $ø_{tronc}$ et un écart-type $\sigma_{\varnothing tronc}$, et sont simulés selon une loi normale entre ($ø_{tronc}$-2.$\sigma_{\varnothing tronc}$) et ($ø_{tronc}$+2.$\sigma_{\varnothing tronc}$). Ils servent pour le calcul de la transmittance des troncs (cf. §.I.7.2.2.). Toutefois, le diamètre d'un tronc ne peut excéder la valeur qui correspond à une section égale à la surface de la cellule élémentaire. En effet, un tronc est toujours représenté par une seule cellule au niveau de sa section. Plusieurs troncs peuvent cependant être juxtaposés.

⇒ Couronne:

Forme des couronnes:

Plusieurs formes de couronnes peuvent être simulées (Fig. 2-4): ellipsoïde, ellipsoïde composé ou tronqué, cône tronqué ou non, trapézoïde. Suivant la forme du houppier, les paramètres (hauteur, largeur, etc.) nécessaires pour la modélisation de la couronne doivent être spécifiés. Ces paramètres sont tous définis par une valeur moyenne Moy et un écart-type σ. La valeur est simulée suivant une loi normale comprise dans l'intervalle [Moy-2σ; Moy+2σ].

Distribution angulaire des feuilles:

La distribution angulaire des éléments foliaires de la couronne $LAD_{feuille}(e)$ doit être spécifiée en fonction de l'espèce des arbres. Comme pour le sous-bois, six distributions angulaires classiques sont possibles.

Distribution des éléments foliaires et du LAI à l'intérieur des couronnes:

Chaque espèce d'arbres est caractérisée par son indice foliaire $LAI_{feuille}(e)$ sur la parcelle et le nombre de cellules foliaires $N_f(e)$. Ce nombre dépend des dimensions et de la forme des houppiers ainsi que du taux de remplissage des couronnes par les cellules «feuille». La distribution des cellules «feuille» est:

1. uniforme: il n'existe pas de cellule « vide » dans les couronnes et toutes les cellules «feuille» ont la même densité foliaire.
2. hétérogène: chaque couronne est supposée constituée de N_c couches caractérisées par un nombre τ qui indique leur proportion minimale de cellules « vide » c'est à dire, la fraction maximale de cellule « feuille ». Cette approche permet ainsi de définir un profil vertical de remplissage maximal, et par suite, un profil de LAI, compte tenu de la forme des couronnes. Le taux de remplissage maximal peut être identique pour toutes les couches de la couronne. A l'intérieur d'une même couche, les cellules « feuille » sont sélectionnées de manière aléatoire. Une fonction de distribution pourrait être introduite pour simuler par exemple, une densité foliaire inversement proportionnelle à la distance au tronc. Le tri aléatoire des cellules implique qu'une cellule peut être sélectionnée plusieurs fois. Sa densité foliaire sera alors proportionnelle au nombre de sélections. Cette approche permet de simuler l'hétérogénéité spatiale de la densité volumique foliaire qui peut être plus ou moins importante selon les espèces d'arbres et selon la dimension des cellules utilisées. De manière à ne pas atteindre des densités foliaires locales irréalistes, le logiciel limite par défaut à 2 le nombre de fois que l'on peut sélectionner une même cellule. Cette constante peut être modifiée. Si cette constante est égale à 1, c'est à dire que l'on ne peut tirer qu'une fois une même cellule, le taux de remplissage maximal est le taux de remplissage réel du houppier.

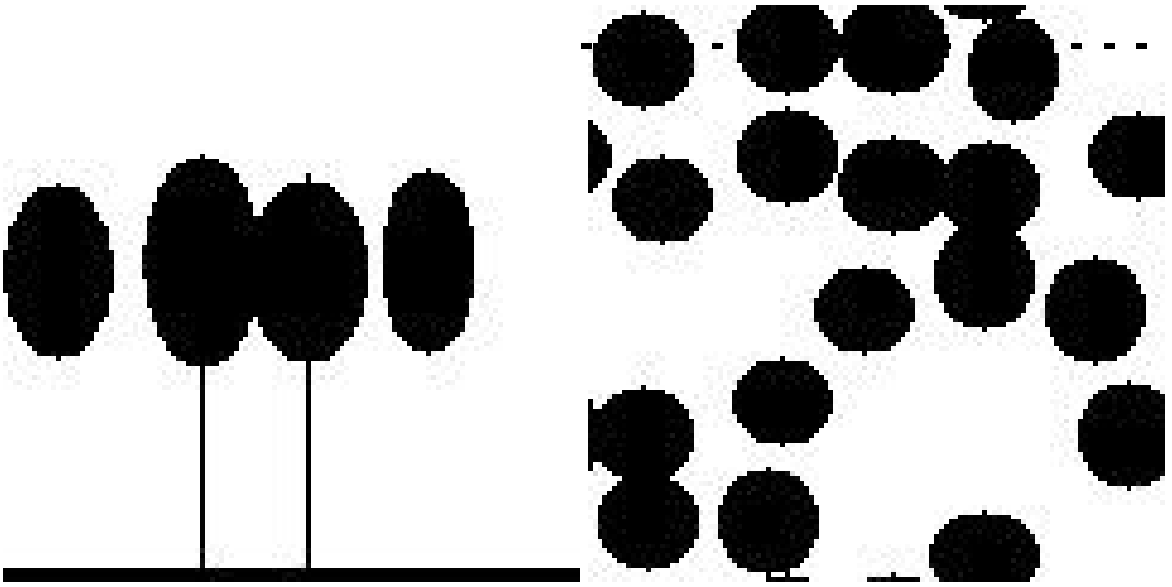
Il existe deux types de distribution des arbres dans la parcelle:

1. Distribution exacte prédéfinie: la position exacte (x,y) de chaque arbre présent dans la parcelle est connue. D'autres caractéristiques géométriques des arbres sont utilisées en tant que paramètres d'entrée. Ce sont en particulier: la taille des

troncs, la forme et les dimensions des couronnes, le LAI de chaque espèce d'arbres, etc. L'ensemble de ces paramètres peut résulter de mesures de terrain exactes ou moyennes.

2. Distribution par rapport à une grille définie par l'opérateur: une grille de pas ΔG_x et ΔG_y selon les axes (Ox) et (Oy), est superposée à la parcelle. Les troncs des arbres sont dans des zones circulaires de rayon r centrées sur les noeuds de ce quadrillage. Ils sont ainsi distribués (1) sur toute la parcelle, (2) dans une zone de forme ellipsoïdale ou (3)dans une surface délimitée par 3 ou 4 points.

   La résolution (ΔG_x,ΔG_y) de la grille permet de simuler diverses densités d'arbres. Le choix d'un rayon r plus ou moins important autorise une plus ou moins grande variabilité spatiale de la position des arbres. De plus, une probabilité de génération d'un arbre aux noeuds du quadrillage a été introduite pour simuler diverses hétérogénéités locales.



(a) (b)

Figure 2-5: Exemple de profils vertical (a) et horizontal (b) d'une maquette. Le profil vertical (a) est repéré sur (b) par un trait pointillé.

Lors de la création de la maquette, des cellules « feuille » ou « tronc » peuvent être placées sur des cellules déjà «remplies». Les trois cas suivants sont distingués:

1. Superposition de cellules « feuille » de la même espèce d'arbres: les densités foliaires sont simplement ajoutées.
2. Superposition de cellules « feuille » d'espèces d'arbres différentes: la cellule perd la densité foliaire de la dernière espèce.
3. Superposition de cellules « tronc » sur cellules « feuille »: la cellule « tronc » efface la cellule « feuille » si le diamètre du tronc est supérieur à un diamètre prédéfini.

I.3. Équation du transfert radiatif

Le modèle DART simule la propagation du transfert radiatif avec la méthode des ordonnées discrètes combinée à l'équation:

$$\left[\mu_m.\frac{d}{dz}+\eta_m.\frac{d}{dy}+\xi_m.\frac{d}{dx}\right]W(r,\Omega_m)=-\alpha(r,\Omega_m).W(r,\Omega_m)+Q(r,\Omega_m).\Delta\Omega_m$$

$$+\sum_{n=1}^{N}\alpha_d(r,\Omega_n\rightarrow\Omega_m).\Delta\Omega_m.W(r,\Omega_n)$$

$W(r,\Omega_n)$ et $W(r,\Omega_m)$ sont respectivement des quantités proportionnelles aux termes $I(r,\Omega_n).\Delta\Omega_n$ et $I(r,\Omega_m).\Delta\Omega_m$, où $I(r,\Omega)$ est l'intensité spécifique selon la direction (Ω). La quantité physique $W(r,\Omega_n)$ représente le flux d'énergie selon la direction $(\Omega_n,\Delta\Omega_n)$ à la position r. Elle correspond au flux de photons qui se propagent dans un cylindre de section infinitésimale ΔS c'est à dire pour $\Delta S<<\Delta x.\Delta y$ et $\Delta x.\Delta z$ et $\Delta y.\Delta z$., et dont l'axe est parallèle à la direction (Ω_n). Elle a la dimension d'une puissance (unité: Watt):

$$W(r,\Omega_n) = L_{\Delta S}(r,\Omega_n).\Delta\Omega_n.\Delta S$$

où $L_{\Delta S}(r,\Omega_n)$ est la luminance de la surface ΔS normale à la direction de propagation (Ω_n). L'intensité spécifique associée au flux $W(r,\Omega_n)$ est définie par: $I(r,\Omega_n)=\frac{W(r,\Omega_n)}{\Delta\Omega_n}$ à l'intérieur d'une surface unité normale à la direction de propagation (Ω_n) et $I(r,\Omega_n)=0$ à l'extérieur de cette surface.

I.4. Rayonnements incidents

Le modèle DART prend en compte à la fois le rayonnement solaire direct et le rayonnement atmosphérique diffus. Ce dernier est en général anisotrope avec une proportion de 5 à 40% du rayonnement total pour des conditions atmosphériques normales (Dave, 1978). Il est donc important de prendre en compte non seulement le rayonnement solaire direct mais aussi le rayonnement atmosphérique. Tous les flux incidents ont pour origine des cellules « vide » de la couche située juste au dessus de la plus haute couche de la scène. Chaque flux qui se propage dans la scène selon la direction (Ω_n) est représenté par un vecteur puissance $W(\Omega_n)$, exprimé en watts. Ainsi, le vecteur associé au rayonnement solaire selon la direction (Ω_s) est:

$$W(\Omega_s)= E_s(\Omega_s).|\mu_s|.\Delta x.\Delta y,$$

où $E_s(\Omega_s)$ correspond à la constante solaire au-dessus de la scène.

De même, les vecteurs puissance associés au rayonnement atmosphérique sont donnés par:

$$W_a(\Omega_n)= L_a(\Omega_n).|\mu_n|.\Delta x.\Delta y.\Delta\Omega_n,$$

où $L_a(\Omega_n)$ est la luminance atmosphérique selon les directions descendantes (Ω_n), avec $n\in[1\ N']$. Les conditions atmosphériques anisotropes sont simulées à l'aide d'une distribution anisotrope de $L_a(\Omega_n)$, spécifiée par l'opérateur. Différentes expressions analytiques sont disponibles dans la littérature: Zibordi et Voss (1989) ont établi par exemple que:

$$L_a(\lambda,\Omega_n)=\frac{E_{0D}(\lambda)}{\pi}.\sigma(\tau_d(\lambda,\Omega_n)).\cos\theta_s.\exp[\frac{-\tau_a(\lambda)}{\cos\theta_s}],$$

où $_d(\ )$ et $_a(\ )$ correspondent respectivement à l'épaisseur optique totale de diffusion et

d'absorption des constituants de l'atmosphère, $E_{0D}(\lambda)$ est l'éclairement solaire en fonction du jour julien, θ_s est l'angle zénithal solaire, et $(\ _d(\ ),\Omega_n)$ est le coefficient de transmission de l'atmosphère à la longueur d'onde λ, selon la direction (Ω_n).

L'éclairement de la scène est donc:

$$\frac{1}{\Delta x.\Delta y}.[W(\Omega_s)+\sum_{n=1}^{N'} W_a(\Omega_n)]$$

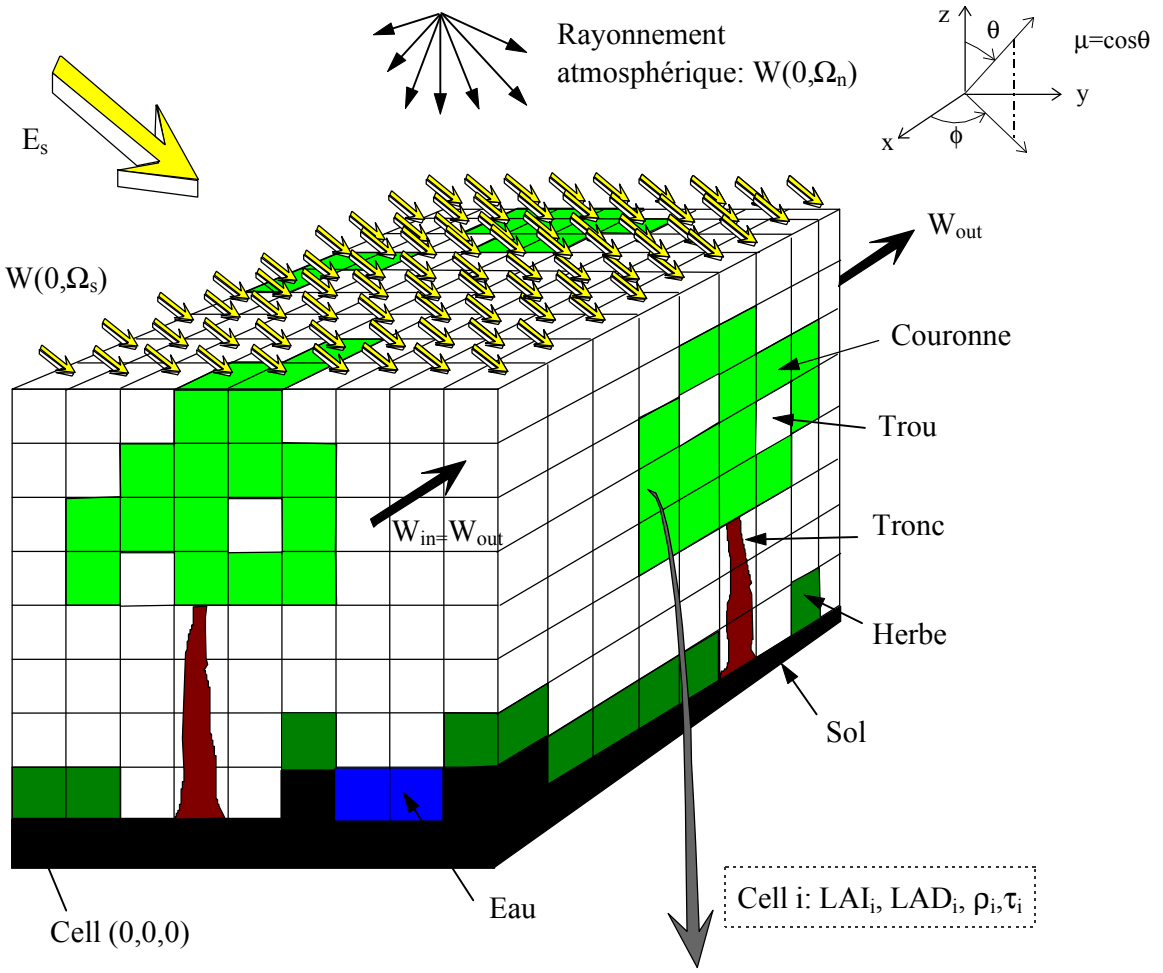


Figure 2-6: Représentation d'une scène DART - Phase d'illumination

I.5. Approche itérative du modèle DART

Le modèle DART simule le transfert radiatif avec le suivi de rayons. Au cours de leur propagation dans la scène, les rayons rencontrent des cellules qui induisent des mécanismes d'interactions qui dépendent du type de ces cellules, c'est à dire du type d'élément représenté et donc de ses propriétés structurales et optiques. Les rayons sont totalement transmis par les cellules vides, totalement interceptés par les cellules opaques comme le sol ou l'eau et partiellement transmis par les cellules semi-opaques comme le tronc ou les éléments foliaires. Le rayonnement intercepté par une cellule donne naissance à des mécanismes de diffusion et d'absorption. Ainsi, une cellule devient une source secondaire lorsqu'elle réémet de l'énergie par diffusion.

Les traitements effectués par le modèle comprennent deux étapes majeures:

- La première étape correspond à l'illumination de la scène par le rayonnement solaire direct. Les rayons solaires sont suivis dans la scène jusqu'à ce que leur énergie soit inférieure à un seuil T_1, choisi par l'opérateur, ou bien que le rayon rencontre un milieu totalement absorbant. Le seuil d'extinction T_1 est égal au vecteur puissance incident multiplié par l'erreur relative tolérée. Les énergies interceptées par les cellules non vides sont systématiquement stockées. Dans l'étape suivante, ces cellules deviennent des sources secondaires.
- Une fois l'illumination réalisée, les vecteurs puissances associés aux sources secondaires et au rayonnement atmosphérique sont traités. Ces rayonnements donnent naissance à des sources tertiaires et ainsi de suite suivant un processus itératif. Toute itération d'ordre k traite donc toutes les sources $k^{ième}$, pour toutes les N directions de diffusion du rayonnement. Le rayonnement qui sort de la maquette par les cellules du haut est stocké à chaque itération. La procédure continue jusqu'à ce que les flux qui se propagent dans la maquette soient inférieurs à un seuil. La valeur de ce seuil est un terme T_2 spécifié par l'opérateur, divisé par 4π, et multiplié par le flux moyen hémisphérique $<\Sigma W>_{1,2}$ et par l'angle solide $\Delta\Omega_n$ du cône de propagation du rayonnement. Le terme $<\Sigma W>_{1,2}$ est la valeur maximale des flux moyens diffusés durant la première et la seconde itération. Ces flux diffusés sont égaux au produit des albédos de diffusion des cellules par l'énergie interceptée par ces cellules. Ainsi, tous les flux $W(\Omega_n)$ qui se propagent dans la scène selon la direction (Ω_n) et qui ont une énergie telle que $W(\Omega_n) < \frac{T_2 . <\Sigma W>_{1,2} . \Delta\Omega_n}{4\pi}$ sont éliminés.

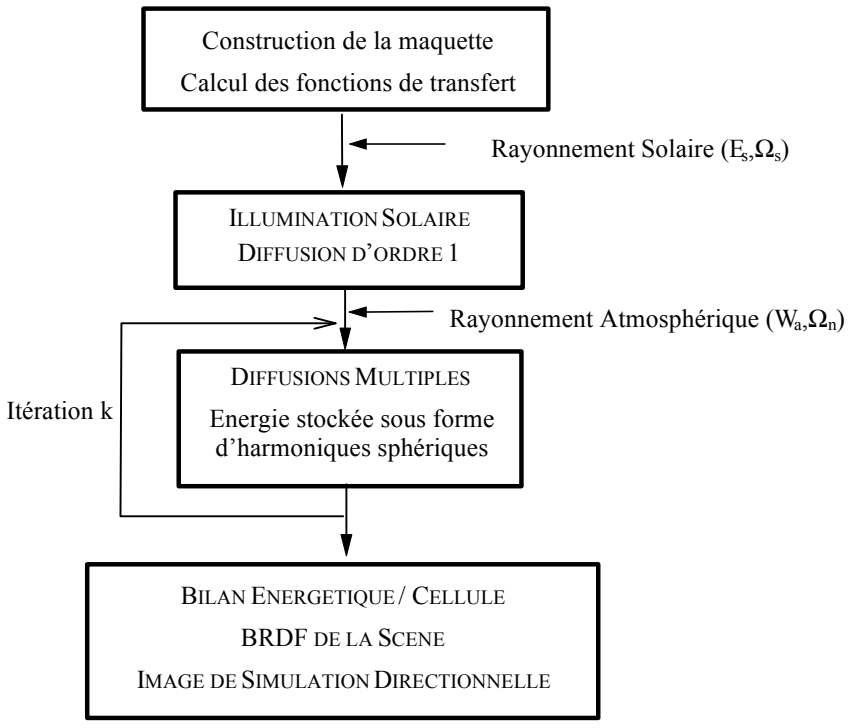


Figure 2-7 : Algorithme du modèle DART.

I.6. Facteur de réflectance bidirectionnelle

Après les itérations successives effectuées par le modèle pour le suivi des flux dans la maquette, les facteurs de réflectance bidirectionnelle sont calculés pour toutes les

cellules de la couche supérieure. Le calcul du vecteur puissance $W_{out}(z=\Delta Z,\Omega_v)$ qui sort de chaque cellule de la couche supérieure dans la direction (Ω_v), permet de déterminer à chaque itération et pour chaque cellule ($z \neq \Delta Z$), le facteur de réflectance bidirectionnelle:

$$R(\Omega_v) = \frac{\pi . W_{out}(z=\Delta Z,\Omega_v)}{\mu_v . \Delta\Omega_v} . \frac{1}{W_s(z=\Delta Z,\Omega_s) + \sum_{n=1}^{N'} W_a(z=\Delta Z,\Omega_n)},$$

où (Ω_v) est la direction de visée d'angles zénithal θ_v ($\mu_v=\cos\theta_v$) et azimutal ϕ_v, $\frac{1}{\Delta x.\Delta y}.[W(z=\Delta Z,\Omega_s) + \sum_{n=1}^{N'} W_a(z=\Delta Z,\Omega_n)]$ est l'éclairement de la scène et, $\frac{1}{\Delta x.\Delta y}.\frac{W_{out}(z=\Delta Z,\Omega_v)}{\mu_v . \Delta\Omega_v}$ la luminance d'une cellule de la couche supérieure dans la direction (Ω_v).

I.7. Mécanismes d'interactions

Tout rayon incident avec une cellule interagit différemment selon son type:

- Cellule « sol »: elles sont représentées soit par (1) leur réflectance lambertienne ρ_{sol}, avec $W_{out}(\Omega_v) = \frac{sol}{} . \ _v . W_{in}(\Omega_s)$, soit par (2) leur fonction de diffusion $T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)$, avec $W_{out}(\Omega_v) = T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v).W_{in}(\Omega_s)$. La variabilité spatiale de la réflectance des sols est simulée en considérant que l'albédo des cellules « sol » suit une loi normale. En présence de relief, les fonctions de diffusion $T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)$ ne peuvent pas être utilisées.
- Cellules « eau »: le principe de représentation est le même que celui des cellules « sol ». En fait, l'utilisation de la fonction $T(\Omega_s,\Omega_v)$ est la seule réellement adaptée car elle permet de simuler la réflectance spéculaire.
- Cellules « tronc »: leur comportement optique est simulée à partir d'un coefficient d'interception η, égal par exemple au rapport des sections du tronc et de la cellule, et d'une fonction de diffusion. Dans le cas d'un vecteur puissance incident $W_{in}(\Omega_s)$, la puissance interceptée est $W_{int} = \eta . W_{in}(\Omega_s)$ et le vecteur puissance W_{out} est donné par:

$$W_{out}(\Omega_s) = (1-\eta).W_{in}(\Omega_s) \text{ et } W_{out}(\Omega_v) = T(\Omega_s,\Omega_v).\eta.W_{in}(\Omega_s)$$

- Cellules « herbe + sol »: le principe de représentation est le même que celui des cellules « sol ».
- Cellules « feuille »: contrairement aux autres types de cellules, les cellules « feuille » sont des milieux turbides qui engendrent des interactions de volume. Leurs propriétés optiques sont représentées par une fonction de transmittance $T(\Omega_s)$ et une fonction de diffusion $T(\Omega_s,\Omega_v)$. Il convient de noter que ces fonctions de transfert ne sont pas associées à l'ensemble de la cellule mais à des éléments de volume de densité foliaire unité.

Les fonctions de transfert qui caractérisent les propriétés optiques des cellules sont soit calculées, soit résultent de mesures. Leur calcul est effectué en même temps que la réalisation de la maquette.

Les paragraphes qui suivent indiquent la méthode utilisée pour calculer les fonctions de transfert des cellules «feuille», «sol» et «tronc».

I.7.1. Mécanismes d'interactions associés aux cellules d'éléments foliaires

I.7.1.1. Fonction de transmission

Les cellules de type « éléments foliaires » sont traitées comme un milieu turbide où les feuilles sont assimilées à de petites surfaces planes dont les normales peuvent prendre n'importe quelle orientation. Les directions des normales (Ω_f) sont indépendantes des N directions de propagation du rayonnement. Leur distribution angulaire est représentée par la fonction de distribution normalisée des directions foliaires $\frac{g_f(j, \Omega_f)}{2\pi}$. Ainsi, $\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} g_f(j, \Omega_f).d\Omega_f = 1$. La densité foliaire des cellules est notée μ.

Le facteur de transmission associé à un rayonnement qui se propage dans la direction (Ω_n) à travers une cellule i d'éléments foliaires de type j est donné par:

$$\boxed{T(\Delta l_i, \Omega_n) = \exp[-G(j,\Omega_n).u_f(i).\Delta l_i]}$$

où $G(j, \Omega_n) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\phi_f \int_0^1 g_f(j,\Omega_f).|\Omega_n.\Omega_f|.d\mu_f$ est un facteur géométrique qui indique la projection moyenne d'une surface unité d'éléments foliaires de la cellule i sur un plan perpendiculaire à la direction (Ω_n) et Δl_i est la longueur de traversée du rayon à travers la cellule i suivant la direction (Ω_n).

On appelle fonction de transmission de la cellule « feuille » de type j, avec $j \in [1\ J]$, la matrice $T(j,\Omega_n)$ de dimensions JxN telle que $T(j,\Omega_n)=\exp[-G(j,\Omega_n)]$ où $n \in [1\ N]$. On a:

$$T(\Delta l_i, \Omega_n) = [T(j,\Omega_n)]^{u_f(i).\Delta l_i}.$$

Le vecteur puissance transmis est fonction de la densité foliaire et de la longueur de propagation du rayonnement dans la cellule. Il ne dépend pas des caractéristiques optiques (fonction de transmission ou de diffusion hémisphérique) des éléments foliaires.

Dans la suite du texte, un rayon de direction (Ω_n) avec $n \in [1\ N]$, tombant sur une cellule i avec $i \in [1\ I]$ sera noté $W(0,\Omega_n)$. De même, le rayonnement transmis par cette cellule après une propagation de longueur Δl_i dans la cellule i sera noté $W(\Delta l_i,\Omega_n)$. Par conséquent, pour un flux incident $W(0,\Omega_n)$ sur une cellule i dans la direction (Ω_n), le flux transmis $W_{out}(\Delta l_i,\Omega_n)$ dans la direction (Ω_n) est:

$$\boxed{W_{out}(\Delta l_i,\Omega_n) = [T(j,\Omega_n)]^{u_f(i).\Delta l_i}.W(0, \Omega_n)}$$

alors que le rayonnement intercepté par la cellule i sur le trajet de longueur Δl_i et dans la direction (Ω_n) est:

$$W_{intercepté}(\Delta l_i,\Omega_n) = [1 - [T(j,\Omega_n)]^{u_f(i).\Delta l_i}.W(0, \Omega_n).$$

I.7.1.2. Fonction de diffusion

La propagation de $W(l,\Omega_s)$ à travers une cellule i dans la direction (Ω_s), où $l \in [0\ \Delta l_i]$

est la longueur du trajet depuis le point d'entrée (A) dans la cellule, donne lieu à une infinité de sources d'énergie de diffusion tout le long du parcours Δl_i. La somme de toutes ces énergies à diffuser dans la direction $(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$ où $v\in[1\ N]$, est noté $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$. Si le type de la cellule est j, $W_1(\Delta l_i, \Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ est égal à:

$$W_1(\Delta l_i, \Omega_s\rightarrow\Omega_v) = \int_{\Delta\Omega_v}\int_{\Delta l_i}\int_{2\pi} W(l,\Omega_s).u_f(i).\left|\Omega_s.\Omega_f\right|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f.dl.d\Omega_v$$

$$= W(0,\Omega_s).\frac{[1-T(\Delta l_i,\Omega_s]}{G(j,\Omega_s)}.\int_{\Delta\Omega_v}\int_{2}\left|\Omega_s.\Omega_f\right|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2}.f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f.d\Omega_v$$

$$= \frac{W_{\text{intercepté}}(\Delta l_i,\Omega_s)}{G(j,\Omega_s)}.\int_{\Delta\Omega_v}\int_{2}\left|\Omega_s.\Omega_f\right|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2}.f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f.d\Omega_v\ ,$$

où $f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ est la fonction de diffusion des éléments foliaires et (Ω_f) indique l'orientation de la normale foliaire.

Le terme $W_1(\Delta l_i, \Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ peut se mettre sous la forme:

$$\begin{aligned} W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) &= W_{\text{intercepté}}(\Delta l_i,\Omega_s).T(j,\Omega_s,\Omega_v) \\ &= W(0,\Omega_s).[1-[T(j,\Omega_n)]^{u_f(i).\Delta l_i}.T(j,\Omega_s,\Omega_v) \end{aligned}$$

où $W(0,\Omega_s)$ est la valeur du flux entrant dans la cellule i dans la direction (Ω_s) et $T(j,\Omega_s,\Omega_v)$ est la fonction de diffusion de la cellule i de type « éléments foliaires » j. Cette fonction de transfert correspond à une matrice de dimensions NxN dont les différents termes sont égaux à:

$$[T(j,\Omega_s,\Omega_v)] = \int_{\Delta\Omega_v}\frac{\int_{2\pi}\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.\left|\Omega_s.\Omega_f\right|.f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f}{G(j,\Omega_s)}.d\Omega_v$$

A la différence des autres types de cellule, la fonction de diffusion $[T(j,\Omega_s,\Omega_v)]$ des cellules « feuille » est décomposée en deux matrices $[T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)]$ et $[T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)]$ de mêmes dimensions. L'objectif est de distinguer les mécanismes d'interaction associés au tissu foliaire et à ses composés biochimiques (chlorophylle, etc.) et les mécanismes d'interaction de surface qui ne font pas intervenir ces composés. Les premiers mécanismes, appelés diffusions de volume, sont représentés par $T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$, et les deuxièmes mécanismes, appelés diffusion de surface, sont représentées par $T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)$. Ces deux fonctions de transfert ne présentent pas de symétrie particulière: elles peuvent être anisotropes. Elles dérivent soit de mesures radiométriques (Sandmeier et al., 1995), soit de calculs effectués par le programme de création de maquettes ou par tout autre moyen. La méthode de calcul utilisée ici repose sur l'hypothèse selon laquelle la fonction de phase foliaire $f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ est la somme d'une composante lambertienne $f_d(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ et d'une composante spéculaire $f_s(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$. Cet exemple est traité par la suite. Ainsi, la fonction de diffusion $[T(j,\Omega_s,\Omega_v)]$ est la somme de deux matrices de diffusion associées aux composantes lambertienne et spéculaire. La composante lambertienne également appelée composante diffuse foliaire, est généralement

associée à la diffusion de volume du rayonnement qui pénètre l'élément foliaire. Selon le domaine spectral, ce rayonnement est plus ou moins absorbé et diffusé par les constituants métaboliques de la feuille et diffusé dans toutes les directions aux interfaces diélectriques foliaires. Ce rayonnement ainsi diffusé est non polarisé (Vanderbilt et al., 1991).

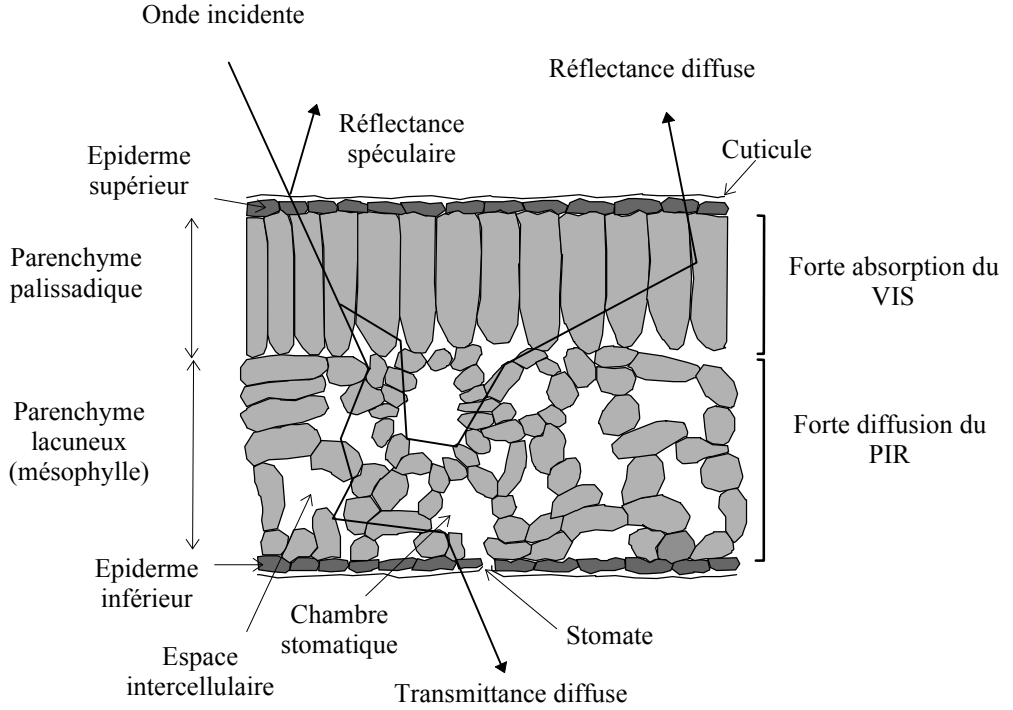


Figure 2-8: Représentation schématique de l'interaction du rayonnement avec une feuille de dicotylédone.

La composante spéculaire $f_s(j,\Omega_f,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ est généralement associée au rayonnement qui ne pénètre pas la feuille et qui est réfléchi de manière spéculaire par la surface de la feuille. La matrice $[T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)]$ associée, est donc liée à la diffusion de surface. Le rayonnement réfléchi de manière spéculaire est généralement considéré comme linéairement polarisé (Egan, 1985). Ce rayonnement peut représenter des proportions importantes de la diffusion foliaire totale. Ainsi, Rondeaux et Herman (1991), ont montré que la proportion de rayonnement polarisé atteint 30%, 17% et 2% du rayonnement total réfléchi dans les domaines spectraux respectivement du vert, rouge et du proche infrarouge pour un couvert de soja, pour un angle de vue zénithal de 30° et un angle zénithal d'illumination de -30° dans le plan d'incidence.

Le flux d'énergie associé à la diffusion lambertienne par les éléments foliaires, c'est à dire le rayonnement qui a subi au moins une diffusion de volume par les feuilles est noté dans la suite du texte $W_{df}(\Omega)$. De même, le flux d'énergie qui n'a subi aucune diffusion de volume par les feuilles est noté $W_{nf}(\Omega)$. La quantité de flux polarisé est noté $W_p(\Omega)$. Ainsi, tout flux qui se propage dans la scène est représenté par le vecteur puissance:

$$[W(\Omega), W_{nf}(\Omega), W_p(\Omega)],$$

où $W(\Omega)=W_{df}(\Omega)+W_{nf}(\Omega)$ correspond à la totalité du rayonnement diffusé.

Les proportions de rayonnement qui résultent des mécanismes de diffusion de volume, de surface et de polarisation sont notées respectivement $df(\Omega)$, $nf(\Omega)$ et $p(\Omega)$. Ainsi, nous avons:

$$W_{df}(\Omega)=df(\Omega).W(\Omega) \quad W_{nf}(\Omega)=nf(\Omega).W(\Omega) \quad W_p(\Omega)=p(\Omega).W(\Omega) \quad \text{avec } df(\Omega)+nf(\Omega)=1.$$

Le rayonnement incident solaire n'étant pas polarisé, le vecteur puissance associé est donc [W(Ω),W(Ω),0].

Les deux paragraphes suivants présentent la méthode effectivement utilisée pour calculer les fonctions de transfert $T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$ et $T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)$.

Diffusion lambertienne des feuilles

Le comportement lambertien des éléments foliaires est modélisé à l'aide des coefficients de réflectance ρ_{df} et de transmittance τ_{df} hémisphériques:

$$f_d(j,\Omega_f,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}.\rho_{df}(j,\Psi_{fs}).\left|\Omega_f.\Omega_v\right| & \text{si } (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) < 0 \\ \frac{1}{\pi}.\tau_{df}(j,\Psi_{fs}).\left|\Omega_f.\Omega_v\right| & \text{si } (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) > 0 \end{cases},$$

où Ψ_{fs} correspond à la différence entre les angles azimutaux de la direction du rayonnement incident (Ω_s) et de la normale des feuilles (Ω_f).

La diffusion foliaire de volume est donc modélisée avec:

$$W_d(\Delta l_i,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{\text{intercepté}}(\Delta l_i,\Omega_s).T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$$
$$\text{et } W_p(\Delta l_i,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{\text{intercepté}}(\Delta l_i,\Omega_s).T_p(j,\Omega_s,\Omega_v), \text{ avec}$$
$$T_d(j,\Omega_s,\Omega_v) = \int_{\Delta\Omega_v} \frac{\int_2 \frac{g_f(j,\Omega_f)}{2}.\left|\Omega_s.\Omega_f\right|.f_d(j,\Omega_f,\Omega_s \rightarrow \Omega_v).d\Omega_f}{G(j,\Omega_s)} d\Omega_v$$
$$\text{et } T_p(j,\Omega_s,\Omega_v) = 0$$

- Réflection spéculaire des éléments foliaires - Polarisation

D'après Vanderbilt et al. (1991), les fonctions de phase spéculaires foliaires $f_s(j,\Omega_f,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ dépendent de trois paramètres: l'angle Ψ_{fs}, précédemment défini, l'indice de réfraction de la surface foliaire n_j (≈1.5) et un facteur de correction $K_j(\kappa,\Psi_{fs})$ du flux spéculaire, entre 0 (surface rugueuse) et 1 (surface lisse), qui caractérise la rugosité des cuticules des éléments foliaires:

$$f_s(j,\Omega_f,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = K_j(\kappa,\Psi_{fs}).\ R_s^2(n_j,\Psi_{fs}).\ \delta(\Omega_s,\Omega_v^*),$$

où $\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)$ est une fonction de Dirac. $\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)=0$ si la direction (Ω_v) est différente de la direction spéculaire (Ω_v^*) du rayonnement incident (Ω_s), sinon $\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)=1$. $\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)$ est une fonction de la direction incidente (Ω_s) et de la normale des éléments foliaires (Ω_f). Le paramètre $K_j(\kappa,\Psi_{fs})$ est une fonction de la configuration angulaire et de la longueur d'onde du flux incident ainsi que des caractéristiques de la surface foliaire. Vanderbilt et al. (1985), ont d'après leurs mesures expérimentales, proposé une valeur constante égale à 0.9 pour ce paramètre. En négligeant la dépendance spectrale, Nilson (1991) montre que:

$$K_j(\kappa,\Psi_{fs}) = \exp[-\kappa.\tan|\Psi_{fs}|],$$

où $\kappa = \frac{2.k}{\pi}$ avec k égal à l'indice foliaire des structures cuticulaires (ou « chevelure

cuticulaire »). $R_s^2(n_j, \Psi_{fs})$ est le carré du coefficient de réflectance spéculaire moyen de Fresnel:

$$R_s^2(n_j, \Psi_{fs}) = \frac{1}{2}.[\frac{\sin^2(\Psi_{fs} - \theta)}{\sin^2(\Psi_{fs} + \theta)} + \frac{\tan^2(\Psi_{fs} - \theta)}{\tan^2(\Psi_{fs} + \theta)}] \text{ avec } \sin\theta = \frac{\sin\Psi_{fs}}{n_j}.$$

La composante polarisée correspond à une fraction du rayonnement spéculaire. Elle est définie par:

$$R_p^2(n_j, \Psi_{fs}) = \frac{1}{2}.[\frac{\sin^2(\Psi_{fs} - \theta)}{\sin^2(\Psi_{fs} + \theta)} - \frac{\tan^2(\Psi_{fs} - \theta)}{\tan^2(\Psi_{fs} + \theta)}].$$

Par la suite, les mécanismes de polarisation sont simulés de manière très simple: la polarisation du rayonnement solaire incident est négligée, et seuls les mécanismes de diffusion d'ordre 1 donnent lieu au phénomène de polarisation.

La diffusion foliaire de surface selon la direction (Ω_v), due à un flux intercepté $W_{intercepté}(\Delta l_i, \Omega_s)$, est donc:

$$W_s(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{intercepté}(\Delta l_i, \Omega_s).T_s(j, \Omega_s, \Omega_v)$$

$$\text{et } W_p(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{intercepté}(\Delta l_i, \Omega_s).T_p(j, \Omega_s, \Omega_v)$$

$$\text{avec } T_s(j, \Omega_s, \Omega_v) \approx \frac{\left|\Omega_s.\Omega_f^*\right| \frac{g_f(j, \Omega_f^*)}{2\pi}.K_j(\kappa, \Psi_{fs}).R_s^2(n_j, \Psi_{fs})}{G(j, \Omega_s)}.\Delta\Omega_f^*$$

$$\text{et } T_p(j, \Omega_s, \Omega_v) \approx \frac{\left|\Omega_s.\Omega_f^*\right| \frac{g_f(j, \Omega_f^*)}{2\pi}.K_j(\kappa, \Psi_{fs}).R_p^2(n_j, \Psi_{fs})}{G(j, \Omega_s)}.\Delta\Omega_f^*.$$

Le terme $\Delta\Omega_f^*$ représente l'angle solide qui comprend toutes les directions des normales des feuilles qui satisfont les conditions de spécularité pour la réflection « $(\Omega_s, \Delta\Omega_s) \rightarrow (\Omega_v, \Delta\Omega_v)$ »:

$$\Omega_s.\Omega_f = -\Omega_v.\Omega_f \qquad \text{et} \begin{cases} \pi - \text{acos}(\Omega_s.\Omega_v) = 2.\text{acos}(\Omega_v.\Omega_f) \text{ si } \Omega_s.\Omega_f < 0 \\ \pi - \text{acos}(\Omega_s.\Omega_v) = -2.\text{acos}(\Omega_v.\Omega_f) \text{ si } \Omega_s.\Omega_f > 0 \end{cases}$$

D'après Reyna and Badhwar (1985), la direction normale des feuilles $(\Omega_f^*) = (\theta_f^*, \phi_f^*)$ qui satisfait les conditions de spécularité, est définie par:

$$\cos\theta_f^* = \frac{\left|\cos\theta_s - \cos\theta_v\right|}{\sqrt{2.(1 - \Omega_s.\Omega_v)}} \text{ et } \tan\phi_s^* = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\theta_s}.\sin\phi_s - \sqrt{1 - \cos^2\theta_v}.\sin\phi_v}{\sqrt{1 - \cos^2\theta_s}.\cos\phi_s - \sqrt{1 - \cos^2\theta_v}.\cos\phi_v}.$$

L'angle solide correspondant à ces directions est (Vanderbilt et al., 1991):

$$\Delta\Omega_f^* = \frac{(\sqrt{\Delta\Omega_s} + \sqrt{\Delta\Omega_v})^2}{4.\left|\Omega_s.\Omega_f\right|}$$

Pour les mécanismes de diffusion d'ordre 1, le rayonnement solaire est considéré

comme un rayonnement mono-directionnel, c'est à dire que l'angle solide associé au rayonnement incident est infiniment petit: $\Delta\Omega_s \approx 0$. L'angle solide associé aux normales des éléments foliaires vérifiant la condition de spécularité se ramène donc à $\Delta\Omega_f^* = \frac{\Delta\Omega_v}{4.\left|\Omega_s.\Omega_f^*\right|}$. Ainsi:

$$W_d(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = \frac{W_{intercepté}(\Delta l_i, \Omega_s)}{G(j,\Omega_s)} . \frac{g_f(j,\Omega_f^*)}{8} . Kj(\ ,\Psi_{fs}) . R_s^2(n_j,\Psi_{fs}) . \Delta\Omega_v$$

$$W_p(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = \frac{W_{intercepté}(\Delta l_i, \Omega_s)}{G(j,\Omega_s)} . \frac{g_f(j,\Omega_f^*)}{8} . Kj(\ ,\Psi_{fs}) . R_p^2(n_j,\Psi_{fs}) . \Delta\Omega_v$$

I.7.1.3. Diffusion d'ordre 1 dans la cellule

L'énergie totale à diffuser dans tout l'espace (4π) après une première interaction du flux solaire incident $W(0,\Omega_s)$, correspond donc à:

$$W_1(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = \sum_{v=1}^{N} [\, W_{d1}(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) + W_{s1}(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) \,] \quad v \in [1\ N],$$

où $W_{d1}(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ et $W_{s1}(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ représentent les flux diffus et spéculaires réfléchis après une première interaction.

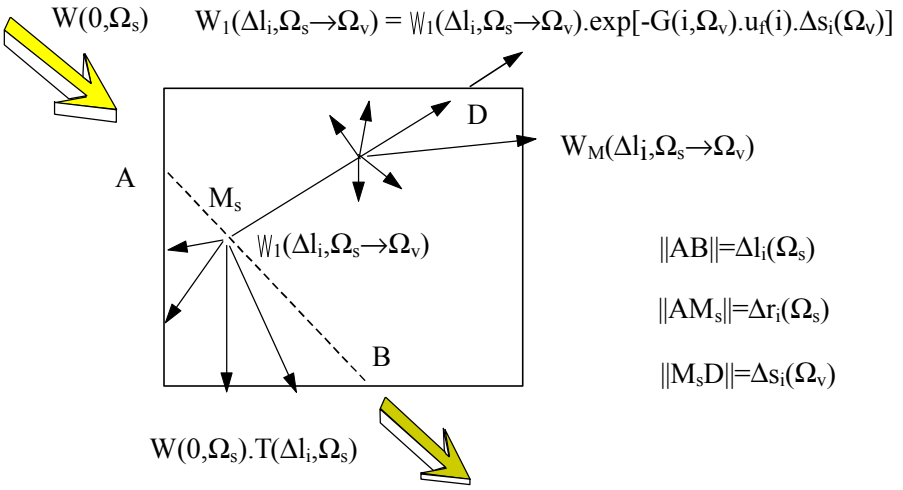


Figure 2-9: Mécanismes de diffusions simples et multiples à l'intérieur d'une cellule d'éléments foliaires avec le modèle DART.

Avant de quitter la cellule, le flux $W_i(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ est partiellement intercepté par les éléments foliaires contenus dans la cellule et donne lieu à de nouveaux mécanismes de diffusion. La transmission du flux $W_i(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ dans la direction (Ω_v) à travers la cellule i, est simulée en considérant que la totalité du flux diffusé $W_i(\Delta l_i, \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ part d'un point unique, appelé « point milieu (M_s) », à l'intérieur de la cellule i. Ce point ne correspond pas au centre de cette cellule, comme dans le modèle K-K de Kimes et Kirchner (1982a). Le fait de considérer (M_s) au lieu du centre de la cellule permet de simuler à la fois avec une beaucoup plus grande précision et de manière simple les mécanismes d'interactions à l'intérieur d'une cellule, spécialement pour des cellules de forte densité foliaire et pour des propagations obliques du rayonnement. Le point (M_s) se situe sur la direction de

propagation à une distance Δr_i du point d'entrée dans la cellule i (Fig. 2-9) telle que le flux intercepté avant ce point est égal au flux intercepté après ce point:

$$W_{intercepté}(\Delta r_i,\Omega_s)=0.5.W_{intercepté}(\Delta l_i,\Omega_s)$$

Ce point est en fait un «barycentre énergétique». La distance Δr_i est donnée par:

$$\Delta r_i = \frac{\ln 2 - \ln[1+\exp(-u_f(i).G(j,\Omega_s).\Delta l_i]}{u_f(i).G(j,\Omega_s)}$$

On appelle $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ le flux qui sort de la cellule i dans la direction (Ω_v) et qui correspond au flux $W_1(\Delta l_i, \Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ non intercepté par les éléments foliaires de la cellule i après une propagation de longueur $\Delta s_i(\Omega_v)$ (Fig. 2-9) à partir du point milieu (M_s). Ce flux correspond à une diffusion d'ordre 1:

$$W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_1(\Delta l_i, \Omega_s\rightarrow\Omega_v).\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)]$$

Le terme $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ comprend une composante diffuse et une composante spéculaire:

$$W_{d1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_{d1}(\Delta l_i, \Omega_s\rightarrow\Omega_v).\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)]$$

$$W_{s1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_{s1}(\Delta l_i, \Omega_s\rightarrow\Omega_v).\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)]$$

Ainsi, pour un rayonnement incident $[W(0,\Omega_s),W_{nf}(\Omega_s),W_p(\Omega_s)]$ sur une cellule i de type j, le flux qui s'échappe de cette cellule dans la direction (Ω_v) après avoir subi une première diffusion est donné par:

$$[W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_{nf,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_{p,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)]$$

où
$$W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = T(\Delta s_i,\Omega_v).T(j,\Omega_s,\Omega_v).(1- T(\Delta l_i,\Omega_s)).W(0,\Omega_s),$$

$$W_{nf,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = T(\Delta s_i,\Omega_v).T_s(j,\Omega_s,\Omega_v).(1- T(\Delta l_i,\Omega_s)).W_{nf}(0,\Omega_s)$$
$$= nf_1(\Omega_s,\Omega_v).W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),$$

et
$$W_{p,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = T(\Delta s_i,\Omega_v).T_p(j,\Omega_s,\Omega_v).(1- T(\Delta l_i,\Omega_s)).W(0,\Omega_s)$$
$$= p_1(j,\Omega_s,\Omega_v).W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),$$

avec $nf_1(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{W_{nf,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}{W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)} = s_1(j,\Omega_s,\Omega_v).nf(\Omega_s),$

$$s_1(j,\Omega_s,\Omega_v)=\frac{T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)}{T(j,\Omega_s,\Omega_v)}$$

$$p_1(j,\Omega_s,\Omega_v)=\frac{W_{p,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}{W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}=\frac{T_p(j,\Omega_s,\Omega_v)}{T(j,\Omega_s,\Omega_v)}.$$

I.7.1.4. Diffusion multiple dans la cellule

Le modèle DART simule les diffusions multiples dans la cellule. Les mécanismes de polarisation sont alors négligés. Les flux résultant de la diffusion multiple dérivent de l'énergie interceptée $W_{1,intercepté}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ sur les chemins $\Delta s_i(\Omega_v)$ au cours de la diffusion simple.

$$W_{1,intercepté}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = [W_{d1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) - W_{d1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)] + [W_{s1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) - W_{s1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)]$$

Les diffusions multiples à l'intérieur d'une cellule sont difficiles à modéliser. Deux hypothèses simplificatrices ont donc été utilisées pour calculer le rayonnement diffusé, d'ordre supérieur à 1, par une cellule:

- la diffusion totale sur π de tout élément de volume d'une cellule « feuille » est représentée par l'albédo simple de diffusion ω_{dj}, et de l'albédo spéculaire ω_{sj}:

$$\omega_{dj} \approx \rho_{dj}+\tau_{dj} \quad \text{et } \omega_{sj} = \frac{1}{4\pi}.\sum_{s=1}^{N} K_j(\kappa,\Psi_{fs}).R_s^2(n_j,\Psi_{fs}).\Delta\Omega_s$$

  Ainsi, la valeur moyenne de l'albédo de diffusion de la cellule i est définie par la somme des différents albédos de diffusion $\omega_j = \omega_{dj} + \omega_{sj}$.

- la transmission moyenne de la cellule, après diffusion d'ordre supérieur à 1, est égale à la transmission moyenne $<T_i>$ depuis le centre de la cellule. Cette moyenne est avec les N directions de diffusion.

Ces deux hypothèses permettent de modéliser le flux diffus d'ordre multiple $W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$ qui sort de la cellule par une série géométrique (Castellu-Etchegorry, 1996):

$$W_M(\Delta l_i,\Omega_s) \approx [\frac{\omega_j.<T_i>}{1-\omega_j.(1-<T_i>)}].W_{i,\text{intercepté}}(\Delta l_i,\Omega_s)$$

Similairement, le flux spéculaire diffusé après plusieurs diffusions multiples au sein de la cellule i et qui s'échappe de celle-ci, est donné par:

$$W_{sM}(\Delta l_i,\Omega_s) \approx [\frac{\omega_{sj}.<T_i>}{1-\omega_{sj}.(1-<T_i>)}].W_{i,\text{intercepté}}(\Delta l_i,\Omega_s).$$

On en déduit donc que le flux diffus foliaire qui s'échappe de la cellule i après avoir subi plusieurs diffusions multiples à l'intérieur de celle-ci, est égal à:

$$W_{dM}(\Delta l_i,\Omega_s) \approx [\frac{\omega_j.<T_i>}{1-\omega_j.(1-<T_i>)} - \frac{\omega_{sj}.<T_i>}{1-\omega_{sj}.(1-<T_i>)}].W_{i,\text{intercepté}}(\Delta l_i,\Omega_s).$$

Le vecteur puissance associé aux diffusions multiples à l'intérieur de la cellule i et qui sort de celle-ci dans la direction (Ω_v) est:

$$[W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_{nf,M}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),0].$$

La distribution directionnelle $W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ de $W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$ est déterminée en supposant que $W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ est proportionnel d'une part, au flux total $W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$ mais aussi, au coefficient de transmission selon le trajet $\Delta s_i(\Omega_v)$, à l'angle solide $\Delta\Omega_v$ et à la section efficace de diffusion des éléments foliaires dans la direction (Ω_v). Ainsi,

$$W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_M(\Delta l_i,\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v).\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N} T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v).\Delta\Omega_v}$$

avec $$TG(j,\Omega_v) = \sum_{s=1}^{N} T(j,\Omega_s,\Omega_v).\ln[T(j,\Omega_s)].\Delta\Omega_s],$$

d'après la relation $$G(j,\Omega_s) = -\ln[T(j,\Omega_s)].$$

Le flux diffusé dans la direction (Ω_v) et qui provient de multiples diffusions

spéculaires dans la cellule, est donné par:

$$W_{nf,M}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)= nf(\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{<T_i>}.s_M(j,\Omega_v).\frac{s_j}{}.W_{sM}(\Delta l_i,\Omega_s),$$

$$\text{avec } s_M(j,\Omega_v)=\frac{TG_s(j,\Omega_v).\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N} TG_s(j,\Omega_v).\Delta\Omega_v} \text{ et } TG_s(j,\Omega_v)=\sum_{v=1}^{N} T_s(j,\Omega_s,\Omega_v).\ln[T(j,\Omega_s)].\Delta\Omega_s].$$

En conclusion, le flux total diffus qui s'échappe de la cellule i dans la direction Ω_v est:

$$[W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)+W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_{nf,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)+W_{nf,M}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_{p,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)]$$

Le flux absorbé associé au rayonnement incident $W(\Omega_s)$ est:

$$W_a(\Delta l_i,\Omega_s)=[W_{intercepté}(\Delta l_i,\Omega_s)-W_1(\Delta l_i,\Omega_s)]+\sum_{v=1}^{N}\{W_{1,intercepté}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)-W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)\}$$

I.7.1.5. Simulation de la rétrodiffusion ou «hot-spot»

Les dimensions finies des éléments foliaires sont responsables d'un pic de diffusion dans la direction de rétrodiffusion, c'est à dire dans la direction d'illumination de la scène. Ce phénomène est appelé rétrodiffusion ou « hot-spot ». Selon certains auteurs (Wenhan and Yuequin, 1994), ce phénomène est particulièrement intéressant puisqu'il est porteur d'une information sur la structure du couvert ; il dépend de la taille, de la forme, de la densité, de l'orientation et de la distribution spatiale des éléments foliaires. La prise en compte du « hot-spot » dans le modèle DART repose sur l'approche de Kuusk (1985),. Cette dernière a été adaptée car les cellules ne sont pas des milieux infinis horizontaux. Ainsi, le coefficient d'extinction du flux diffusé $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ dans la cellule i à partir du « point milieu » et à la distance $\delta s_i(\Omega_v)$ de ce point, n'est plus $u_f(i).G(i,\Omega_v)$ mais:

$$\alpha_a(\Omega_s,\Omega_v,\delta s_i)=u_f(i).G(i,\Omega_v).\left[1-\sqrt{\frac{G(\Omega_s).\cos\theta_v}{G(\Omega_v).|\cos\theta_s|}}.\exp[-\frac{\Delta(\Omega_s,\Omega_v)}{s_f}.\delta s_i(\Omega_v).\cos\theta_v]\right]$$

où $\Delta(\Omega_s,\Omega_v)=\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_v}+\frac{1}{\cos^2\theta_s}-\frac{2.\cos(-\Omega_s.\Omega_v)}{|\cos\theta_s.\cos\theta_v|}}$ et s_f est la dimension foliaire.

L'atténuation de $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ sur le trajet $\Delta s_i(\Omega_v)$ est: $\exp\left[-\int_{\Delta s_i(\Omega_v)}\alpha_a(\Omega_s,\Omega_v,r).dr\right]$.

Le « hot-spot » n'est simulé que pour les diffusions d'ordre 1.

I.7.1.6. Itérations d'ordre 1 et multiple

Le modèle DART procède par itérations successives. Compte tenu de l'importance des diffusions d'ordre 1, simulées dans la première itération, deux approches différentes sont utilisées pour l'itération d'ordre 1 et les itérations suivantes.

- Première itération:

Pour cette première itération (k=1), le rayonnement incident correspond au

rayonnement solaire ($\Omega_s=\Omega_{sun}$). Ce rayonnement est non foliaire ($nf(\Omega_s)=1$) et est supposé non polarisé ($p(\Omega_s)=0$). Le rayonnement solaire $[W(\Omega_s),W(\Omega_s),0]$ incident traversant une cellule i suivant le trajet $(\Delta l_i,\Omega_s)$, donne naissance à du rayonnement diffusé qui s'échappe de la cellule i dans la direction (Ω_v):

$$[W_{total}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_{nf}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_p(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)],$$

où $W_{total}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ correspond à la somme du (1) flux $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ diffusé dans la direction (Ω_v) à partir du « point milieu » et atténué jusqu'à la sortie de la cellule et des (2) flux $W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ ayant subi une ou plusieurs diffusions au sein de la cellule.

$$W_{total}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)+W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),$$

$$W_{nf}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=s_1(j,\Omega_s,\Omega_v).W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)+\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{<T_i>}.s_M(j,\Omega_v).\frac{\omega_{sj}}{\omega_j}.W_{sM}(\Delta l_i,\Omega_s)$$

$$W_p(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=p_1(j,\Omega_s,\Omega_v).W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$$

Les termes $df(\Delta l_i,\Omega_s,\Omega_v)$, $nf(\Delta l_i,\Omega_s,\Omega_v)$ et $p(\Delta l_i,\Omega_s,\Omega_v)$ associés sont:

$$nf(\Delta l_i,\Omega_s,\Omega_v)=\frac{W_{nf}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}{W_{total}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}$$

$$=\frac{s_1(j,\Omega_s,\Omega_v).W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)+\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{<T_i>}.s_M(j,\Omega_v).\frac{\omega_{sj}}{\omega_j}.W_{sM}(\Delta l_i,\Omega_s)}{W_{total}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}$$

$$p(\Delta l_i,\Omega_s,\Omega_v)=\frac{W_p(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}{W_{total}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}=\frac{p_1(j,\Omega_s,\Omega_v).W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}{W_{total}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}$$

En fait, chaque cellule peut être éclairé par plusieurs rayons solaires. Nous appelons N le nombre total de rayons incidents. Le flux associé à chaque rayon incident sur une même cellule est noté $W(n,\Omega_s)$ où $n\in[1\ N]$. Par conséquent, le flux total diffusé qui s'échappe de la cellule i dans la direction (Ω_v) est donné par:

$$[\sum_{n=1}^{N}W_{total}(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v),W_{nf}(\Omega_v),W_p(\Omega_v)],$$

avec:

$$W_{nf}(\Omega_v)=\sum_{n=1}^{N}W_{nf}(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=\sum_{n=1}^{N}nf(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v).W_{total}(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$$

$$W_p(\Omega_v)=\sum_{n=1}^{N}W_p(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=\sum_{n=1}^{N}p(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v).W_{total}(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$$

A chaque interaction, c'est à dire pour tous les rayons incidents qui interagissent avec la cellule, le rayonnement intercepté $W_{intercepté}(\Delta l_i(n),\Omega_s)$ et les coordonnées du point milieu (M_s) sont stockés. En effet, il est important de conserver ces quantités car elles permettent de calculer les flux $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ et $W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$. La sommation des flux polarisés $W_p(\Delta l_i(n),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ est possible car tous les flux diffusés d'ordre 1 ont la même direction de

polarisation.

Les cellules qui ont intercepté une certaine quantité de rayonnement pendant cette première phase de traitement, deviennent des sources secondaires lors de l'itération suivante.

- Itérations > 1:

Dans ce cas, le rayonnement incident sur les cellules provient de tout l'espace (4π). Il est noté:

$$[W(0,\Omega_n), W_{nf}(\Omega_n), W_p(\Omega_n)].$$

Il correspond au rayonnement solaire déjà diffusé ou au rayonnement atmosphérique incident. Dans une première approximation, en considérant que le rayonnement incident tend à devenir isotrope, la composante diffuse polarisée est négligée. Ainsi, pour un rayonnement incident traversant une cellule i suivant le trajet ($\Delta l_i,\Omega_n$), le flux qui s'échappe de cette cellule dans la direction (Ω_v) est noté:

$$[W_{total}(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v), W_{nf}(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v), 0],$$

où $W_{total}(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v) = W_1(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v) + W_M(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v)$ et,

$$W_{nf}(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v) = nf(\Omega_n).[s_1(j,\Omega_s,\Omega_v).W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) + \frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{< T_i >}.s_M(j,\Omega_v).\frac{\omega_{sj}}{\omega_j}.W_{sM}(\Delta l_i,\Omega_s)]$$

En fait, chaque cellule est illuminée dans cette phase par un nombre N de rayons qui se propagent dans toutes les directions ($\Omega_{n(n)}$) de l'espace 4π, $n \in [1\ N]$ et $n \in [1\ N]$. Par conséquent, le flux total diffusé qui s'échappe de la cellule i dans la direction (Ω_v) correspond à:

$$[\sum_{n=1}^{N} W_{total}(\Delta l_i(n), \Omega_{n(n)} \rightarrow \Omega_v), \sum_{n=1}^{N} W_{nf}(\Delta l_i(n), \Omega_{n(n)} \rightarrow \Omega_v), 0].$$

L'approche ne peut pas être identique à celle de la première itération. En effet, de manière à calculer la distribution du rayonnement diffusé, il faudrait stocker en mémoire pour chaque rayon traversant une cellule, d'une part, le rayonnement intercepté $W_{intercepté}(\Delta l_i(n),\Omega_{n(n)})$ mais également les coordonnées du point milieu $M_s(n)$ associé et la direction du rayonnement. Compte tenu des capacités « mémoire » des machines actuelles, cette procédure devient impossible pour l'étude de scènes de grandes dimensions. De ce fait, une nouvelle approche a été adoptée. Lors de la propagation d'un rayonnement incident $W(0,\Omega_n)$, les intensités spécifiques associés aux flux diffusés $W(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v)$ et $W_{nf}(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v)$ sont immédiatement calculées et représentées par un développement en harmoniques sphériques:

$$I(\Delta l_i,\Omega_n \rightarrow \Omega_v) = \sum_{l=0}^{L} \sum_{m=-l}^{l} C_{lm}(i,k).Y_{lm}(\theta,\phi)$$

où $Y_{lm}(\theta,\phi)$ correspond aux harmoniques normalisées, C_{lm} sont les coefficients associés. L est un nombre entier dans l'intervalle $[0\ \infty]$ indiquant l'ordre du développement. Ce nombre est choisi par l'opérateur en fonction du comportement anisotrope du milieu. m varie toujours entre -l et +l. Les harmoniques sphériques normalisées sont définies par Sillon et al. (1991):

$$Y_{lm}(\theta,\phi) = \begin{cases} N_{lm}.P_{lm}(\cos\theta).\cos(m\phi) & \text{si } m > 0 \\ N_{l0}.P_{l0}(\cos\theta)/\sqrt{2} & \text{si } m = 0 \\ N_{lm}.P_{lm}(\cos\theta).\sin(|m|\phi) & \text{si } m < 0 \end{cases}.$$

Les coefficients $P_{lm}(x)$ correspondent aux polynômes associés de Legendre définis par la relation de récurrence suivante:

$$\begin{cases} P_{l,m}(x) = x.\dfrac{(2l-1)}{(l-m)}P_{(l-1),m}(x) - \dfrac{(l+m-1)}{(l-m)}.P_{(l-2),m}(x) \\ P_{(m+1),m}(x) = x.(2m+1).P_{m,m}(x) \\ P_{m,m}(x) = (1-2m).\sqrt{(1-x^2)}.P_{m-1,m-1}(x) \end{cases}$$

Le terme initial de cette relation est $P_{0,0}(x) = 1$.

Les termes N_{lm} sont des constantes normalisées égales à $N_{lm} = \sqrt{\dfrac{(2l+1)}{2\pi}.\dfrac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}}$.

Les coefficients $C_{lm}(i,k)$ de la cellule, pour la $k^{ième}$ itération, sont calculés avec:

$$C_{lm}(i,k,\Omega_n) = \sum_{v=1}^{N} W_{total}(\Omega_n \rightarrow \Omega_v).Y_{lm}(\Omega_v)$$

Les coefficients $C_{lm}(i,k,\Omega_n)$ ainsi que les flux $W_{total}(\Omega_v)$ et $W_{nf}(\Omega_v)$, sont calculés durant la $(k-1)^{ième}$ itération. A chaque interaction avec la cellule i, c'est à dire pour chaque rayon o interagissant avec la cellule, de nouveaux coefficients $C_{lm}(i,k,\Omega_{n(n)})$ sont calculés et ajoutés aux coefficients $C_{lm}(i,k,\Omega_{n(n-1)})$ associés à l'interaction précédente. Ainsi, les coefficients $C_{lm}(i,k)$ résultant de l'interaction entre tous les rayons incidents et la cellule i, sont:

$$C_{lm}(i,k) = \sum_{n=1}^{N} C_{lm}(i,k,\Omega_{n(n)})$$

où N est le nombre total de rayons incidents interagissant avec la cellule i.

Les flux diffusés $[W_{total}(i,\Omega_v), W_{nf,total}(i,\Omega_v), 0]$ qui s'échappent de la cellule i sont à nouveau calculés dans la $(k+1)^{ième}$ itération avec les expressions:

$$W_{total}(i,\Omega_v) = \sum_{l=0}^{L}\sum_{m=-l}^{l} C_{lm}(i,k).Y_{lm}(\theta,\phi).\Delta\Omega_v$$

$$W_{nf,total}(i,\Omega_v) = \sum_{l=0}^{L}\sum_{m=-l}^{l} C_{lm,nf}(i,k).Y_{lm}(\theta,\phi).\Delta\Omega_v$$

Le développement en harmoniques sphériques est mal adapté pour des configurations particulièrement anisotropes. Tel est le cas pour des milieux opaques comme le sol. En effet, la diffusion du rayonnement incident a toujours lieu dans le demi-hémisphère supérieur à la surface du sol ; aucun rayonnement n'est diffusé en dessous de cette surface.

De plus, certains types de sol présentent une composante spéculaire ou de rétrodiffusion très importante ce qui ne fait qu'accentuer le comportement anisotrope de la diffusion. En présence de telles surfaces, il faut adapter l'approche développée ci-dessus pour restituer de manière correcte la distribution de la diffusion, stockée sous la forme d'un développement en harmoniques sphériques. Une solution consiste à rendre symétrique la distribution angulaire des flux diffusés $W_{total}(i,\Omega_v)$ et $W_{nf,total}(i,\Omega_v)$, puis à ne considérer que les directions « vraies » lors du calcul de $W_{total}(i,\Omega_v)$ et $W_{nf,total}(i,\Omega_v)$ avec les coefficients $C_{lm}(i,k)$.

I.7.2. Mécanismes d'interactions associés aux cellules non foliaires

Les mécanismes d'interactions associés aux cellules « non foliaire » de type « sol » et « tronc » sont développés ci-dessous:

I.7.2.1. Cellules de type «Sol »

- Fonctions de diffusion des cellules de type « sol »

Comme pour les cellules de type « éléments foliaires », les propriétés optiques des cellules de type « sol » sont représentées par: (1) une fonction de transfert $T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)$ établie à partir de mesures expérimentales ou calculée à partir d'un modèle de réflectance bidirectionnelle de sol et, (2) une fonction de transfert de polarisation associée, notée $T_{p,sol}(\Omega_s,\Omega_v)$. La fonction $T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)$ représente la somme de différents mécanismes de diffusion: lambertien, spéculaire, hot-spot, etc. L'ensemble des diffusions de volume qui expliquent la réflectance d'un sol sont représentées par une simple diffusion de surface.

Le rayonnement diffusé est simulé à partir du centre des faces des cellules « sol » et non à partir du centre des cellules comme dans le cas des cellules « feuille ». Ainsi, l'énergie interceptée par une cellule « sol » n'est pas stockée pour l'ensemble de la cellule mais pour chaque face de cette cellule. Chaque face devient ensuite une source secondaire qui diffusera dans son demi-hémisphère supérieur.

La fonction de transfert $T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)$ est définie par:

$$T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)= \frac{R(\Omega_s,\Omega_v)}{\pi}.\cos\theta_v.\Delta\Omega_v,$$

où $R(\Omega_s,\Omega_v)$ correspond au facteur de réflectance bidirectionnel. Différents types de facteur de réflectance bidirectionnel ont été introduits pour représenter trois comportements optiques de sol:

1. modélisation lambertienne seule,
2. modélisation lambertienne plus une composante spéculaire et,
3. modélisation selonHapke (1963):

⇒ Modèle lambertien

Dans le cas d'une modélisation lambertienne du sol, le facteur de réflectance bidirectionnelle est équivalent au coefficient de réflectance hémisphérique:

$$R(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{sol}$$

La fonction de transfert est ainsi définie par:

$$T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\rho_{sol}}{\pi}.\cos\theta_v.\Delta\Omega_v$$

De manière à introduire une certaine variabilité naturelle des propriétés optiques du sol, le coefficient de réflectance hémisphérique du sol varie spatialement, selon une loi gaussienne de moyenne ρ_{sol} et d'écart-type $\sigma_{\rho_{sol}}$. Dans le cas d'un écart-type nul, le sol correspond à un sol lambertien de réflectance hémisphérique constante.

Actuellement, le modèle DART simule le relief dans le seul cas d'un sol lambertien.

⇒ Modèle lambertien avec une composante spéculaire

Le comportement lambertien du sol est calculé de la même façon que dans le paragraphe précédent. Une composante spéculaire est simplement ajoutée pour la direction d'observation (Ω_v) qui correspond à la direction spéculaire (Ω_v^*). La composante spéculaire est calculée de la même façon que dans le cas des éléments foliaires (cf. §.I.7.1.2.), à partir de l'angle $\Psi_{sol,s}$ entre la direction incidente et la normale à la surface du sol, de l'indice de réfraction du sol n_j et d'un paramètre de rugosité $K_j(\kappa,\Psi_{sol,s})$. Ainsi,

$$R_{spec}(\Omega_s,\Omega_v)=K_j(\kappa,\Psi_{sol,s}).\ R_s^2(n_j,\Psi_{sol,s}).\ \delta(\Omega_s,\Omega_v^*)$$

où $\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)$ est une fonction de Dirac. $\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)=0$ si la direction (Ω_v) est différente de la direction spéculaire (Ω_v^*) du rayonnement incident (Ω_s), sinon $\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)=1$. $R_s^2(n_j,\Psi_{fs})$ est le carré du coefficient de réflectance spéculaire moyen de Fresnel:

$$R_s^2(n_j,\Psi_{sol,s})=\frac{1}{2}.\left[\frac{\sin^2(\Psi_{sol,s}-\theta)}{\sin^2(\Psi_{sol,s}+\theta)}+\frac{\tan^2(\Psi_{sol,s}-\theta)}{\tan^2(\Psi_{sol,s}+\theta)}\right] \text{ avec } \sin\theta=\frac{\sin\Psi_{sol,s}}{n_j}.$$

Le facteur de réflectance bidirectionnel total est équivalent dans ce cas à:

$$R(\Omega_s,\Omega_v)=\rho_{sol}+K_j(\kappa,\Psi_{sol,s}).\ R_s^2(n_j,\Psi_{sol,s}).\ \delta(\Omega_s,\Omega_v^*)$$

La fonction de transfert est définie par:

$$T_{sol}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\rho_{sol}+K_j(\kappa,\Psi_{sol,s}).R_s^2(n_j,\Psi_{sol,s}).\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)}{\pi}.\cos\theta_v.\Delta\Omega_v$$

La fonction de polarisation (cf.§.I.7.1.2) associée est donnée par:

$$T_{sol,p}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{K_j(\kappa,\Psi_{sol,s}).R_p^2(n_j,\Psi_{sol,s}).\delta(\Omega_s,\Omega_v^*)}{\pi}.\cos\theta_v.\Delta\Omega_v$$

où $R_p^2(n_j, \Psi_{sol,s}) = \frac{1}{2}.[\frac{\sin^2(\Psi_{sol,s} - \theta)}{\sin^2(\Psi_{sol,s} + \theta)} - \frac{\tan^2(\Psi_{sol,s} - \theta)}{\tan^2(\Psi_{sol,s} + \theta)}]$.

La polarisation du rayonnement solaire incident n'est pas prise en compte. De plus, seuls les mécanismes de diffusion d'ordre 1 donnent lieu au phénomène de polarisation.

⇒ Modèle de Hapke:

Le modèle de Hapke assimile le sol à une surface plane d'altitude z=0 qui sépare un demi-espace vide (z>0) d'un demi-espace (z<0) composé de particules sphériques irrégulières, disposées aléatoirement et dont la dimension est grande devant la longueur d'onde. Ce milieu est supposé soumis à un éclairement E_s selon la direction $\Omega_s(\mu_s=\cos\theta_s,\Phi_s)$ et observé selon la direction $\Omega_v(\mu_v=\cos\theta_v,\Phi_v)$. La luminance totale $L(\Omega_v)$ par unité de surface et d'angle solide du détecteur, peut être considérée comme la somme de deux composantes liées d'une part, à la diffusion simple $L_1(\Omega_v)$ et d'autre part, à la diffusion multiple $L_M(\Omega_v)$:

$$L(\Omega_v)=L_1(\Omega_v)+L_M(\Omega_v)$$

Chadrasekhar (1960) a montré que pour un milieu semi-infini, le terme $L_M(\Omega_v)$ est très peu dépendant de la fonction de phase $P(\Omega_s, \Omega_v)$ des particules. Le terme de diffusion simple est donc calculé de façon exacte pour n'importe quelle fonction de phase, alors que l'on suppose une diffusion isotrope ($P(\Omega_s, \Omega_v)=1$) pour la diffusion multiple.

La résolution de l'équation du transfert radiatif permet d'obtenir:

$$L_1(\Omega_v) = E_s.\frac{\omega}{4\pi}.\frac{\mu_s}{\mu_s - \mu_v}.P(\Omega_s, \Omega_v)$$

$$L_M(\Omega_v) = E_s.\frac{\omega}{4\pi}.\frac{\mu_s}{\mu_s - \mu_v}.\left[H(\omega,-\mu_s).H(\omega,\mu_v) - 1\right],$$

où ω est l'albédo simple de diffusion, c'est à dire le rapport entre l'énergie diffusée et l'énergie totale diffusée et absorbée par les particules. Quatre types de fonctions de phase $P(\Omega_s, \Omega_v)$ sont généralement utilisées dans la littérature:

1. diffusion isotrope: $P(\Omega_s, \Omega_v) = 1$,
2. diffusion centrée sur la direction du spéculaire,
3. diffusion centrée sur la direction de rétrodiffusion et,
4. diffusion mixte qui regroupe les cas intermédiaires entre la diffusion spéculaire et la rétrodiffusion.

Le tableau 2-2 donne quelques fonctions de phase extraites de la littérature, censées représenter la plupart des cas usuels.

La fonction H(ω,x) est définie par:

$$H(\omega, x) = \frac{1 + 2.x}{1 + 2.\sqrt{1-\omega}.x}.$$

Hapke (1963) a montré que pour un angle de phase Ψ_{sv} faible (<20°), les mécanismes d'éclairement et de diffusion d'une particule sont très corrélés: la lumière s'échappe préférentiellement dans la direction du « hot-spot ». Ce phénomène survient uniquement lors de diffusions d'ordre 1, c'est à dire pour le terme $L_1(\Omega_v)$. Hapke a de ce fait introduit une fonction de rétrodiffusion $B(\Omega_s,\Omega_v)$ afin de prendre en compte ce phénomène. Cette fonction dépend de l'angle de phase Ψ_{sv}, d'un paramètre de rugosité h lié à la porosité du milieu (Fig. 2-10a) et d'un terme empirique B_0 (Fig. 2-10c) décrivant l'amplitude du « hot-spot ». Elle est donnée par:

$$B(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{1}{1+\frac{1}{h}.\tan\frac{\Psi_{sv}}{2}}.$$

La solution de l'équation du transfert radiatif devient donc:

$$L(\Omega_v) = E_s.\frac{\omega}{4\pi}.\frac{\mu_s}{\mu_s-\mu_v}.\left[\left[1+B(\Omega_s,\Omega_v)\right]P(\Omega_s,\Omega_v)+H(\omega,-\mu_s).H(\omega,\mu_v)-1\right].$$

Le facteur de réflectance bidirectionnel est défini par:

$$R(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{L(\Omega_v)}{L_{ref}(\Omega_v)} = \frac{\pi.L(\Omega_v)}{E_s.\mu_s},$$

$$\boxed{R(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\omega}{4}.\frac{1}{\mu_s-\mu_v}.\left[\left[1+B(\Omega_s,\Omega_v)\right]P(\Omega_s,\Omega_v)+H(\omega,-\mu_s).H(\omega,\mu_v)-1\right]}$$

Auteur	Distribution de la diffusion	Fonction de phase $P(\Omega_s,\Omega_v)$
-	isotrope	1
Hapke (1963)	spéculaire	$\frac{4}{9}.(1-\frac{1}{2}.\cos\Psi_{sv})^2$
Hapke (1963)	rétrodiffusion	$\frac{4\pi}{5}\left[\frac{\sin\Psi_{sv}+(\pi-\Psi_{sv})\cos\Psi_{sv}}{\pi}+\frac{(1-\cos\Psi_{sv})^2}{10}\right]$
Henyey et Greenstein, (1941)	mixte	$\frac{1-g^2}{\left[1+g^2-2.g.\cos\Psi_{sv}\right]^{1.5}}$
Hapke (1981)	mixte	$1+b.\cos\Psi_{sv}+c.\frac{3.\cos^2\Psi_{sv}-1}{2}$
Pinty et al. (1989)	mixte	$1+b_1.\cos\Psi_{sv}+c_1.\frac{3.\cos^2\Psi_{sv}-1}{2}+b_2.\cos\Psi'_{sv}+c_2.\frac{3.\cos^2\Psi'_{sv}-1}{2}$

Tableau 2-2: Exemples de fonction de phase $P(\Omega_s,\Omega_v)$ extraites de la littérature. Le coefficient g de la fonction de phase de Henyey et Greenstein correspond à un facteur d'asymétrie qui quantifie le comportement anisotrope de la lumière diffusée par une seule particule.

La figure 2-10 montre l'influence des paramètres h, ω, B_o et des coefficients b_1, c_1, b_2 et c_2 sur la réflectance d'un sol qui peut être représenté par la fonction de phase de Pinty et al. (1989) (cf. Tableau 2-2). On remarque que les paramètres h et B_0 influent respectivement sur la largeur et l'amplitude du pic de rétrodiffusion (Fig. 2-10a et c). Les valeurs des coefficients b_1, c_1, b_2 et c_2 permettent de caractériser le comportement anisotrope de la diffusion (Fig. 2-10d). Par exemple, le quadruplé (b_1 c_1 b_2 c_2) égal à (1 0.5 0 0) permet de caractériser une diffusion arrière importante.

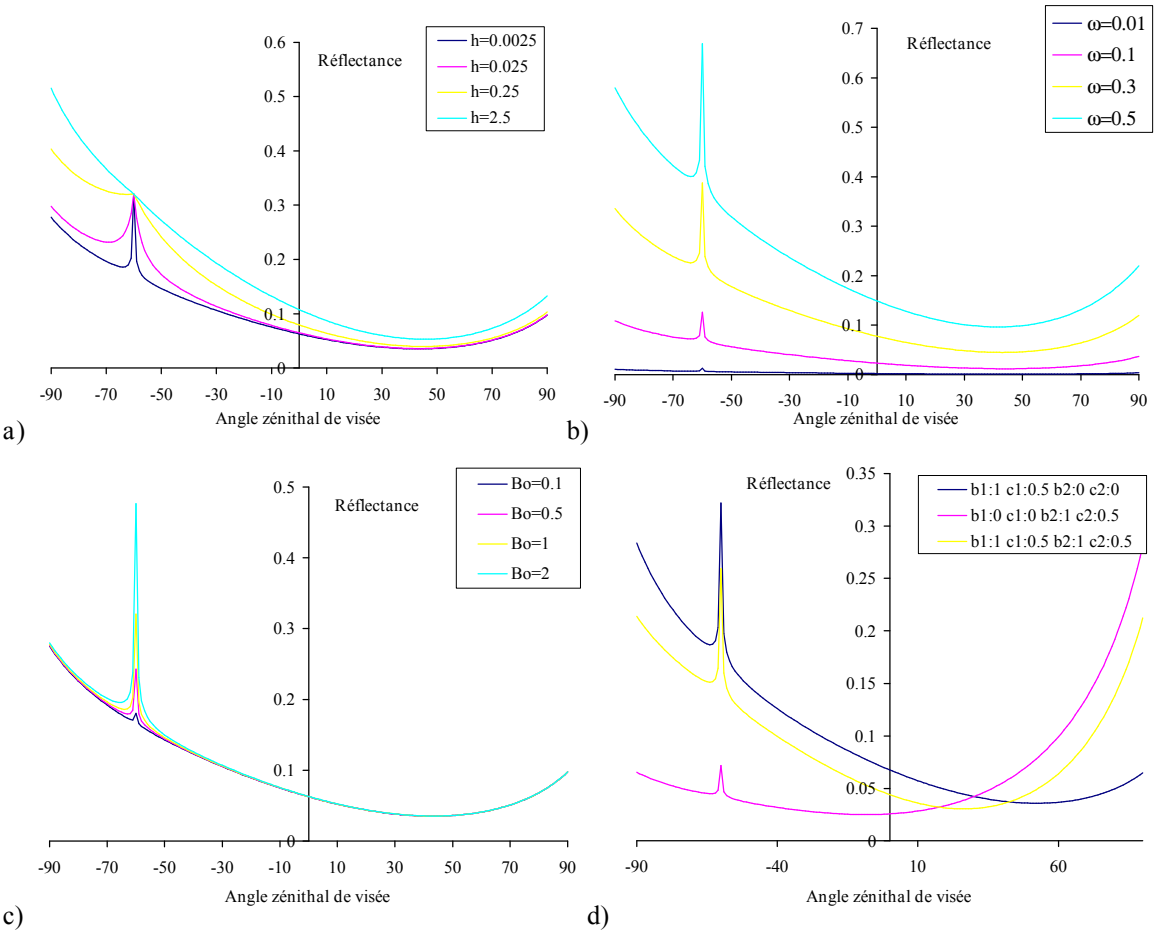


Figure 2-10: Influence des paramètres (a) h, (b) , (c) B_o et (d) des coefficients b_1, c_1, b_2, et c_2 sur la réflectance dans le cas d'une fonction de phase de Pinty et al. (1989). Les simulations ont été effectuées dans le plan principal pour une configuration de base telle que $_s$=60°, =0.25, B_o=1, h=0.0025, b_1=c_1=1 et b_2=c_2=0.

La composante polarisée est calculée comme dans le cas d'un sol lambertien avec une composante spéculaire.

- Équations de transfert des cellules de type « sol »

Tous les flux diffusés par une cellule de sol ont le même facteur non foliaire nf(Ω) que celui du rayonnement incident [W(0,Ω_s)]. Ainsi, le flux diffusé dans la direction (Ω_v) correspond dans la notation à trois dimensions, à:

$$[W_{total}(\Omega_v), W_{nf,total}(\Omega_v), W_{p,total}(\Omega_v)]$$

avec $W_{total}(\Omega_v) = T_{sol}(j,\Omega_s,\Omega_v).W(0,\Omega_s)$,

$W_{nf,total}(\Omega_v) = nf(\Omega_s).W_{total}(\Omega_v)$.

L'expression des flux diffusés dépend en fait, comme pour les cellules « feuille », de l'ordre d'itération et du nombre N de rayons qui interagissent avec la cellule:

⇒ Itération k=1: $(\Omega_s)=(\Omega_{sun})$ et $nf(\Omega_s)=1$

$$W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} T_{sol}(j,\Omega_s,\Omega_v).W(0,\Omega_s) = T_{sol}(j,\Omega_s,\Omega_v).\sum_{n=1}^{N} W(0,\Omega_s)$$

$$W_{nf,total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} W_{nf,total}(\Omega_v) = W_{total}(\Omega_v)$$

$$W_{p,total}(\Omega_v) = p_1(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{total}(\Omega_v) \text{ avec } p_1(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{T_{p,sol}(j,\Omega_s,\Omega_v)}{T_{sol}(j,\Omega_s,\Omega_v)}$$

⇒ Itération k>1:

$$W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} T_{sol}(j,\Omega_{n(n)},\Omega_v).W(0,\Omega_{n(n)})$$

$$W_{nf,total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} nf(\Omega_{n(n)}).W_{total}(\Omega_v)$$

$$W_{p,total}(\Omega_v) = 0$$

I.7.2.2. Cellules de type «Tronc »

- Fonctions de transfert des cellules de type « tronc »

Les cellules de tronc sont des cellules qui ont en général, une importance mineure sur le transfert radiatif. Comme le sol, ces cellules sont caractérisés par deux fonctions de transfert de diffusion $T_{tronc}(\Omega_s,\Omega_v)$ et de polarisation $T_{p,tronc}(\Omega_s,\Omega_v)$. Les mécanismes de polarisation sont simulés sans prendre en compte la polarisation du rayonnement incident $W(0,\Omega_s)$. Les cellules de tronc sont assimilées à des cellules semi-opaques de réflectance hémisphérique ρ_{tronc} et de coefficient d'extinction η. Le paramètre η est indépendant du rayonnement incident et est équivalent au rapport entre la section du tronc et la surface de la face latérale de la cellule élémentaire qui contient l'élément de tronc.

Pour un flux incident $W(0,\Omega_n)$, le coefficient de transmission est donné par:

$$\boxed{T_{tronc}(\Omega_n) = 1 - \eta}$$

Ainsi, pour une cellule vide, $T_{tronc}(\Omega_n) \xrightarrow{\eta \to 0} 1$ et pour une cellule entièrement pleine, $T_{tronc}(\Omega_n) \xrightarrow{\eta \to 1} 0$.

La fonction de diffusion $T_{tronc}(\Omega_n,\Omega_v)$ est simplement définie par:

$$\boxed{T_{tronc}(\Omega_n,\Omega_v) = \frac{W_{diffus}(\Omega_v)}{W(0,\Omega_n)} = \frac{\rho_{tronc}}{\pi}.\left|\Omega_c.\Omega_v\right|.\ .\Delta\Omega_v}$$

où ρ_{tronc} est la réflectance hémisphérique du tronc et (Ω_c) correspond à la direction de la normale de la face de la cellule illuminée.

- Équations de transfert des cellules de type « tronc »

Comme dans le cas des cellules de type « sol », les mécanismes d'interactions ont lieu au niveau des faces. Les six faces peuvent donc devenir dans l'itération suivante, des sources secondaires. Tout le rayonnement diffusé par une cellule de type « tronc » étant « non foliaire », le coefficient nf(Ω) des flux incidents et diffusés est constant. Ainsi, pour un flux incident $W(0,\Omega_s)$, le vecteur puissance diffusé est:

$$[W_{total}(\Omega_v), W_{nf,total}(\Omega_v), W_{p,total}(\Omega_v)]$$

avec $W_{total}(\Omega_v) = T_{tronc}(\Omega_s,\Omega_v).W(0,\Omega_s)$,

$W_{nf,total}(\Omega_v) = nf_{in}(\Omega_s).W_{total}(\Omega_v)$,

et $W_{p,total}(\Omega_v) = T_{p,tronc}(\Omega_s,\Omega_v).W(0,\Omega_s)$.

L'expression des flux diffusés dépend comme dans le cas des cellules de type « sol » de l'ordre d'itération et du nombre de rayons qui interagissent avec la cellule:

⇒ Itération k=1: $(\Omega_s)=(\Omega_{sun})$ et $nf(\Omega_s)=1$

$$W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} T_{tronc}(\Omega_s,\Omega_v).W(0,\Omega_s) = T_{tronc}(\Omega_s,\Omega_v).\sum_{n=1}^{N} W(0,\Omega_s))$$

$$W_{nf,total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} W_{nf,total}(\Omega_v) = W_{total}(\Omega_v)$$

$$W_{p,total}(\Omega_v) = p_1(\Omega_s,\Omega_v).W_{total}(\Omega_v) \text{ avec } p_1(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{T_{p,tronc}(\Omega_s,\Omega_v)}{T_{tronc}(\Omega_s,\Omega_v)}$$

⇒ Itération k>1:

$$W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} T_{tronc}(\Omega_{n(n)},\Omega_v).W(0,\Omega_{n(n)})$$

$$W_{nf,total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} nf(\Omega_{n(n)}).W_{total}(\Omega_v)$$

$$W_{p,total}(\Omega_v) = 0$$

En résumé, il apparaît que:

- pour un rayonnement transmis sans interception à travers une cellule, les termes df(Ω), nf(Ω) et p(Ω) restent constants. Les coefficients df(Ω) et nf(Ω) ne sont modifiés que dans le cas des cellules « feuille ».
- la simulation des mécanismes de diffusion à l'intérieur des cellules ne prend pas en compte l'état de polarisation du rayonnement intercepté. Cette simplification conduit à des réductions importantes des temps de calcul. En effet, une simulation exacte de la polarisation nécessiterait l'introduction de matrice de Muller 4x4 (Coulson, 1988) pour chaque direction de diffusion à la place des deux coefficients $T(\Omega_s,\Omega_v)$ et $T_p(\Omega_s,\Omega_v)$.

II. RESULTATS ET ANALYSES DE SIMULATIONS DART

L'objectif de ce paragraphe est de présenter des exemples de simulations DART réalisées pour tester la consistance du modèle et étudier sa sensibilité à certains paramètres.

II.1. Études préliminaires

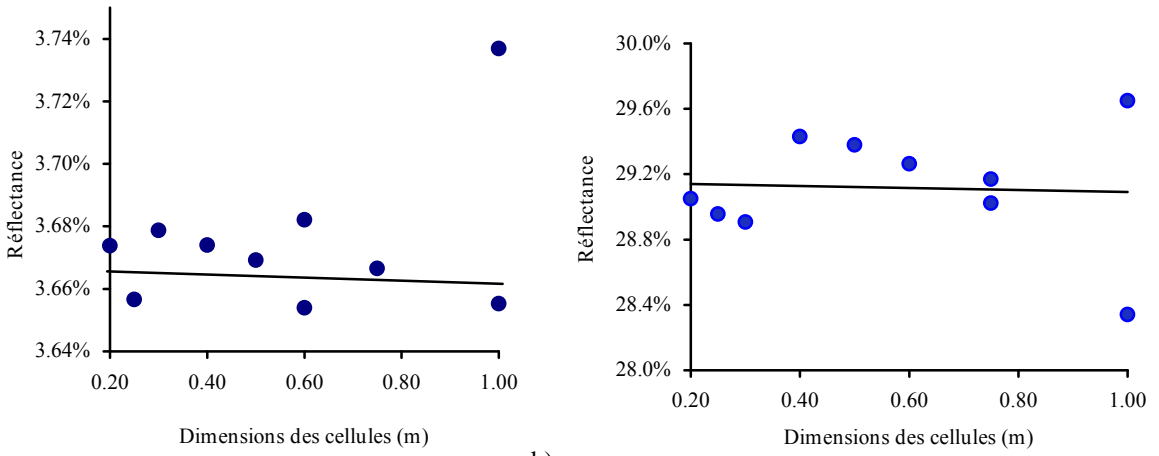
Les simulations présentées dans ce paragraphe ont toutes été effectuées pour la même configuration d'éclairement: rayonnement incident solaire avec un angle zénithal de 148.8° (31.2° pour l'angle off-nadir) et un angle azimutal de 42° et sauf cas contraire rayonnement atmosphérique nul (SKYL=0). Cette configuration angulaire correspond environ à la configuration expérimentale pour laquelle des données aéroportées ont été acquises au-dessus de la forêt de «Nézer» dans les Landes (cf. Chap3).

II.1.1. Influence de la dimension des cellules élémentaires

Un premier test a consisté à vérifier que les valeurs du facteur de réflectance restent constantes lorsqu'on augmente les dimensions des cellules élémentaires. Deux types de milieu ont été considérés:

1. Milieu de végétation homogène: la scène est assimilée à plusieurs couches homogènes de type « éléments foliaires » superposées à une couche de sol plan lambertien.
2. Milieu arboré: la scène est assimilée à une plantation régulière d'arbres. Le sol correspond à un plan lambertien et le sous-bois est homogène. Les caractéristiques moyennes des arbres ont été choisies de manière à obtenir deux taux de couverture respectivement égaux à 34 et 53%.

Les simulations ont été menées avec 92 directions pour la propagation du rayonnement, dans le vert ($\rho_f = \tau_f = 15\%$) et le proche infrarouge ($\rho_f = \tau_f = 45\%$), et pour des dimensions de cellules élémentaires allant de 20 cm à 1 m. Au-delà de 1 m, il est difficile de faire une représentation réaliste du milieu étudié: le découpage en cellules de grandes dimensions a tendance à regrouper des éléments de natures différentes.



a) b)

Figure 2-11: Influence de la dimension des cellules sur la réflectance d'une plantation régulière de taux de couverture: a) 34% et b) 53%, dans le a) vert et le b) proche infrarouge et pour une configuration angulaire de visée a) à la verticale et pour b) $_v$=37.21° et $_v$=340°. Dans le cas où le taux de couverture n'a pu être suffisamment approché, deux simulations ont été effectuées pour des taux de couverture encadrant le taux désiré.

Il a été vérifié que les dimensions (Δx,Δy) du découpage n'a aucune influence sur la BRDF des milieux homogènes. La figure 2-11 montre deux exemples de résultats dans le cas d'un milieu arboré: la réflectance varie peu avec l'augmentation de la taille des cellules élémentaires. Les faibles variations de la réflectance entre 3.65 et 3.74 dans le vert, et 28.3 et 29.6 dans le proche infrarouge, sont dues à la représentation discrète de la scène. En effet, selon les dimensions des cellules élémentaires, il est parfois impossible de simuler des scènes avec exactement le même taux de couverture. Dans le cas où le taux de couverture n'a pu être suffisamment approché, deux simulations ont été effectuées pour des taux de couverture encadrant le taux désiré. On constate de plus, que pour une échelle d'échantillonnage de 1 m, la dispersion sur la réflectance est plus grande. Ceci est lié à une représentation plus difficile du paysage.

II.1.2. Influence du nombre d'itérations

Une deuxième étude a consisté à évaluer le nombre d'itérations suffisant pour calculer la BRDF d'une scène. Comme dans l'étude précédente, deux scènes correspondant à une plantation régulière de taux de couverture égal à 34 et 53%, ont été simulées dans le visible et le proche infrarouge jusqu'à la convergence énergétique.

		Itérations postérieures			Itération finale
	N° Itération	2	3	4	5
Itérations antérieures	1	1:13.08 - 9.15 2:12.60 - 8.91			1:14.65 - 10.29 2:14.09 - 10.01
	2		1:1.63 - 1.11 2:1.54 - 1.07		1:1.88 - 1.26 2:1.77 - 1.21
	3			1:0.23 - 0.14 2:0.22 - 0.14	1:0.25 - 0.15 2:0.24 - 0.14
	4				1:0.23 - 0.01 2:0.03 - 0.00

(a)

		Itérations postérieures					Itération finale
	N° Itération	4	...	7	8	9	10
Itérations antérieures	3	1:8.03 - 6.60 2:8.04 - 6.48					1:15.66 - 13.10 2:15.82 - 12.86
	...		...				...
	6			1:1.18 - 0.97 2:1.20 - 0.96			1:2.32 - 1.89 2: 2.37 - 1.87
	7				1:0.64 - 0.52 2:0.65 - 0.51		1:1.15 - 0.92 2:1.18 - 0.92
	8					1:0.34 - 0.27 2:0.35 - 0.27	1:0.52 - 0.41 2:0.53 - 0.41
	9						1:0.18 - 0.14 2:0.19 - 0.14

(b)

Tableau 2-3: Différences relatives (%) maximale et moyenne de la réflectance entre les itérations successives et l'itération de convergence énergétique d'une plantation forestière de taux de couverture de (1) 34% et (2) 53%. Simulations dans (a) le visible (toutes les itérations) et (b) le proche infrarouge (5 itérations sur 10).

Le tableau 2-3 donne les différences relatives (%) maximales et moyennes des réflectances directionnelles (pour toutes les directions d'observations) entre 2 itérations successives et avec l'itération finale c'est à dire celle pour laquelle la convergence énergétique est atteinte. Dans la mesure où l'on accepte une erreur relative moyenne de l'ordre de 0.15%, la convergence énergétique est atteinte à l'ordre 3 dans le visible et à l'ordre 9 dans le proche infrarouge, pour les deux taux de couverture considérés (Tableau 2-3). Les différences relatives maximales et moyennes associées aux taux de couverture de 34 et 53% sont du même ordre de grandeur.

L'obtention de la convergence énergétique nécessite parfois un nombre d'itérations plus important que dans cette étude (Fig. 2-11). C'est le cas en particulier des milieux denses où les composants de la scène ont des albédos élevés (cas des forêts denses dans le domaine spectral du proche infrarouge) ou dans le cas d'une illumination par une forte proportion de rayonnement atmosphérique diffus. Les photons peuvent être diffusés un grand nombre de fois avant d'être absorbés ou de sortir de la scène. Dans le cas de grandes scènes, les temps de calcul peuvent donc devenir très importants. Pour remédier à ces contraintes, une technique d'accélération de la convergence énergétique, appelée « approche de Gauss-Siedel », a été développée (Gastellu-Etchegorry et al., 1996b). Elle permet de converger plus rapidement et par suite elle minimise les temps de calcul des simulations.

		Itérations postérieures		Itération finale
	N° Itération	2	3	4
Itérations antérieures	1	1:14.04 - 9.82 2:13.50 - 9.56		1:14.66 - 10.33 2:14.10 - 10.01
	2		1:0.98 - 0.51 2:0.91 - 0.49	1:1.04 - 0.53 2:0.96 - 0.50
	3			1:0.06 - 0.02 2:0.05 - 0.02

(a)

		Itérations postérieures				Itération finale
	N° Itération	4	5	6	7	8
Itérations antérieures	3	1:4.94 - 3.49 2:4.92 - 3.39				1:7.43 - 5.07 2:7.43 - 4.93
	4		1:1.77 - 1.17 2:1.78 - 1.14			1:2.62 - 1.66 2: 2.64 - 1.62
	5			1:0.62 - 0.38 2:0.62 - 0.38		1:0.86 - 0.51 2:0.88 - 0.50
	6				1:0.20 - 0.11 2:0.20 - 0.11	1:0.25 - 0.13 2:0.25 - 0.13
	7					1:0.05 - 0.02 2:0.04 - 0.02

(b)

Tableau 2-4: Différences relatives maximale et moyenne (%) de la réflectance entre les itérations successives et l'itération de convergence énergétique d'une plantation forestière de taux de couverture de (1) 34% et (2) 53%. Simulations dans (a) le visible et (b) le proche infrarouge avec l'approche de Gauss-Siedel.

Dans l'approche classique, les coefficients $C_{lm}(i,k)$ et $C_{lm,nf}(i,k)$ sont calculés pour chaque cellule i non vide à l'aide de l'énergie diffusée par les sources de l'itération (k-1) ; k étant l'itération en cours (>1). Avec l'approche de Gauss-Siedel, l'opérateur a alors la possibilité de calculer ces coefficients avec l'énergie diffusée par les sources de l'itération (k-1) mais aussi de l'itération k. Ainsi, l'approche utilise directement les valeurs des coefficients C_{lm} mises à jour au fur et à mesure des calculs. Cette approche nécessite moins d'itérations pour atteindre la convergence énergétique (Tableau 2-4): 4 itérations au lieu de 5 avec l'approche classique sont maintenant suffisantes dans le visible et 8 au lieu de 10 dans le proche infrarouge. On remarque toutefois que 2 itérations dans le visible et 5 dans le proche infrarouge, donnent des précisions tout à fait acceptable de la BRDF (erreur relative moyenne de l'ordre de 0.5%). Le seul inconvénient à cette approche, est qu'il n'est plus possible de différencier les valeurs de la réflectance ou des énergies absorbées pour les ordres de diffusion successifs ; celles-ci sont maintenant mélangées.

Les simulations ont également montré que les valeurs de la réflectance convergent de manière exponentielle (Fig. 2-11) avec les itérations successives, dans le cas de couverts homogènes ou hétérogènes. De ce fait, les valeurs de la réflectance pour la convergence énergétique, peuvent être directement déduite d'une fonction d'extrapolation exponentielle. Ceci permet de ne pas effectuer toutes les itérations et ainsi de diminuer fortement les temps de calcul des simulations. La fonction analytique d'extrapolation choisie est:

$$A - B.e^{-C.k}$$

où k est le numéro de l'itération et A, B et C des coefficients calculés pour chaque pixel et pour chaque direction d'observation à l'aide des valeurs obtenues pour les itérations (1,2,3) dans le visible et les itérations (2,3,4) dans le proche infrarouge. Les tableaux 2-5 montrent les différences relatives entre les trois méthodes utilisées pour atteindre la convergence énergétique: approche classique, approche de Gauss-Siedel et méthode d'extrapolation exponentielle. On remarque qu'il est très intéressant d'utiliser cette dernière méthode car elle permet à partir des trois ou quatre premiers ordres de diffusion d'atteindre la convergence énergétique avec une erreur relative moyenne très acceptable (<0.3%). Cette méthode diminue fortement les temps de calcul des simulations en particulier pour le proche infrarouge où 4 ordres de diffusion suffisent alors qu'avec la méthode classique 10 itérations sont nécessaires. De plus et contrairement à l'approche de Gauss-Siedel, il est possible à l'aide de cette dernière méthode de déduire les valeurs pour chaque ordre de diffusion.

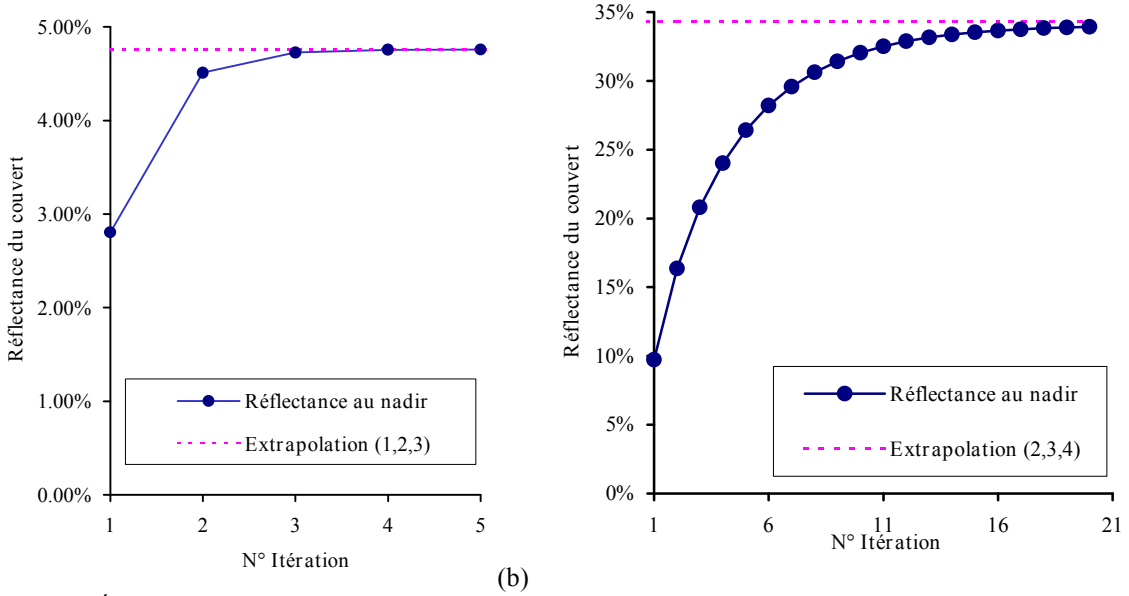
(a)

	Approche de Gauss-Siedel	Extrapolation (1,2,3)
Itération 5	1:0.02 - 0.00 2:0.02 - 0.00	1:0.29 - 0.05 2:0.24 - 0.03

(b)

	Approche de Gauss-Siedel	Extrapolation (2,3,4)
Itération 10	1:0.02 - 0.01 2:0.02 - 0.01	1:0.72 - 0.24 2:0.55 - 0.27

Tableau 2-5: Comparaison des différences relatives (%) maximale et moyenne de la réflectance avec trois méthodes (Méthode classique, Approche de Gauss-Siedel et fonction d'extrapolation) pour l'obtention de la convergence énergétique d'une plantation forestière de taux de couverture de (1) 34% et (2) 53%. Simulations dans (a) le visible et (b) le proche infrarouge.

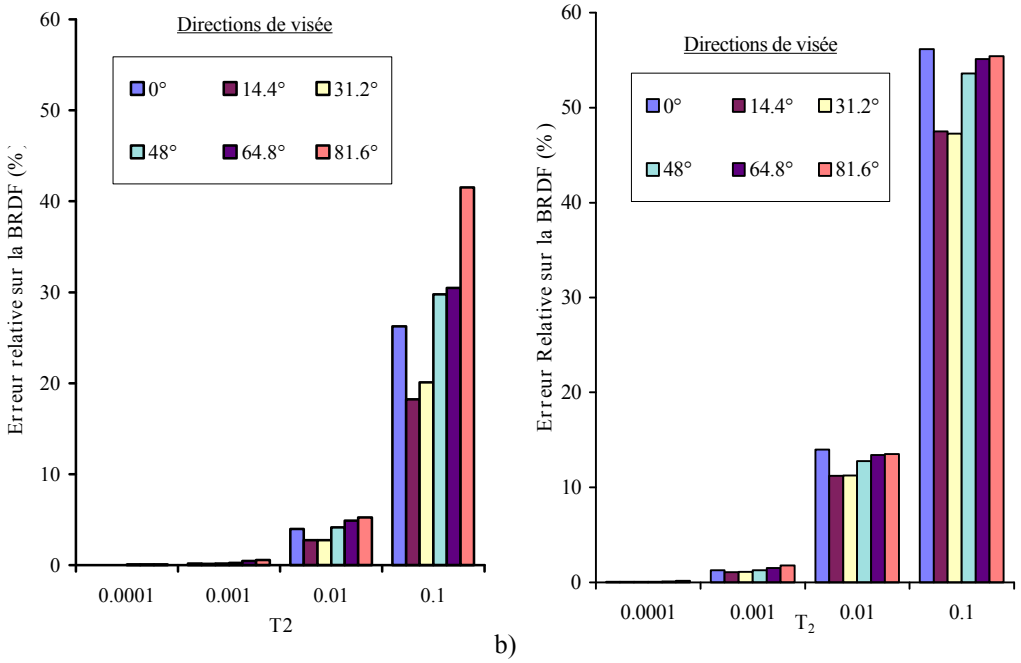


(a) (b)

Figure 2-12: Évolution de la réflectance avec les itérations successives dans le cas d'une plantation éclairée par du rayonnement solaire et atmosphérique. La valeur obtenue avec la méthode d'extrapolation exponentielle est indiquée en traits pointillés. Simulations dans (a) le vert et (b) le proche infrarouge.

II.1.3. Influence du seuil T_2

Une troisième étude a consisté à évaluer l'influence du seuil qui contrôle la propagation des flux diffus dans la maquette au cours d'une simulation. En effet, les flux diffus $W(\Omega_n)$ qui se propagent dans la scène dans la direction (Ω_n) et qui ont une énergie telle que $W(\Omega_n) < \frac{T_2 . < \Sigma W >_{1,2} . \Delta\Omega_n}{4\pi}$ sont éliminés. T_2 est un facteur spécifié par l'opérateur et $<\Sigma W>_{1,2}$ est le flux moyen hémisphérique, c'est à dire la valeur maximale des flux moyens cumulés qui sortent des cellules au cours de la première et la seconde itération (cf. §.I.5.).



a) b)

Figure 2-13: Influence du seuil d'arrêt des flux diffus. Erreur relative maximale sur la réflectance d'une plantation forestière simulée dans (a) le vert et (b) le proche infrarouge.

Dans ce contexte, une plantation régulière a été simulée dans les domaines spectraux du vert et du proche infrarouge, avec des facteurs T_2 variant entre 10^{-1} et 10^{-4}. La figure 2-13 représente pour différentes configurations d'observation, les différences relatives maximales entre ces simulations et une simulation pour laquelle tous les rayons ont été suivis jusqu'à ce que leur énergie soit nulle, c'est à dire pour $T_2 = 0$.

On remarque que, d'une manière générale, l'erreur commise dans le proche infrarouge est plus importante que dans le visible. Ainsi, le facteur T_2 doit être égal à 10^{-3} dans le visible et 10^{-4} dans le proche infrarouge pour commettre une erreur relative inférieure à 0.5%. Cette constatation est intéressante car elle permet également de diminuer les temps calcul des simulations d'environ 1/3, puisqu'il n'est plus nécessaire de suivre les rayons jusqu'à leur extinction énergétique totale.

Les résultats préliminaires présentés ont permis d'évaluer l'influence de certains paramètres et ainsi, d'ajuster leurs valeurs pour minimiser les temps de calculs des simulations futures. Il faut toutefois noter que ces résultats ont été obtenus pour des configurations bien précises (configuration d'illumination, caractéristiques géométriques et optiques du milieu, etc.) et qu'une généralisation de ces résultats nécessiterait une étude de sensibilité plus approfondie.

II.2. Simulations DART d'une parcelle forestière et analyses

L'exemple particulier de simulations DART d'une parcelle forestière de pins d'âge moyen de 40 ans est ici présenté. Cette parcelle a été simulée dans les domaines spectraux du vert, du rouge et du proche infrarouge. Les simulations ont été conduites avec une résolution spatiale (taille des cellules élémentaires) de 25 cm. La maquette simulée correspond à une scène de 120x120x89 cellules élémentaires avec 239 769 cellules « non vides ». Les simulations ont été effectuées avec 92 directions pour la propagation du rayonnement. Les principales caractéristiques biophysiques moyennes de cette parcelle sont: (1) densité: 250 arbres/ha, (2) hauteur des arbres: 21 m, (3) diamètre du tronc: 35 cm, (4) hauteur du tronc: 11 m, (5) forme du houppier: ellipsoïde, (6) diamètre du houppier: 5.5 m, (7) LAI: 1.59, (8) LAD: sphérique et (9) espacement moyen entre les arbres: 6 m. Conformément aux mesures de Rock et al. (1994), la réflectance et la transmittance des aiguilles de pins ont été fixées respectivement dans le vert, rouge et proche infrarouge, à 10%, 5% et 40%. Le sol correspond à un plan horizontal lambertien de réflectance hémisphérique ρ_{sol} égale à 15%, 20% et 25% respectivement dans les trois domaines spectraux cités précédemment. Le sous-bois est assimilé à une couche homogène de hauteur H_{herbe} égale à 0.5 m et de LAI égal à 2. Les réflectances et transmittances foliaires du sous-bois sont fixées à 15%, 5% et 45% dans le vert, rouge et proche infrarouge.

La figure 2-15 représente la BRDF de la parcelle simulée dans le domaine spectral du vert pour un éclairement solaire ($\theta_s = 148.8°$ $\phi_s = 42°$) sans diffusion atmosphérique. Le système de coordonnées polaires pour la représentation de la BRDF est présenté dans la figure 2-14. Il correspond à un système de coordonnées cylindriques ($x=k.\theta.\cos\phi$, $y=k.\theta.\sin\phi$) où θ et ϕ sont les angles zénithaux et azimutaux de la direction d'observation.

La courbe de la BRDF de la parcelle décrite au-dessus (Fig. 2-14 et 2-15) présente la forme d'un « bol ». En effet, la réflectance a tendance à augmenter avec l'angle zénithal d'observation. Cet effet est plus ou moins grand en fonction de l'angle azimutal de visée. Le « hot-spot » apparaît bien pour la direction de visée correspondant à la direction d'illumination.

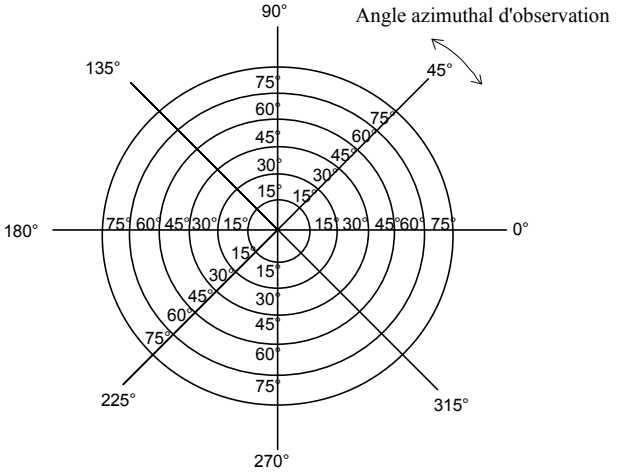


Figure 2-14: Système de coordonnées des directions d'incidence $_s$ et de visée $_v$ pour la représentation des réflectances bidirectionnelles. Les distances à l'origine indiquent (angle off-nadir).

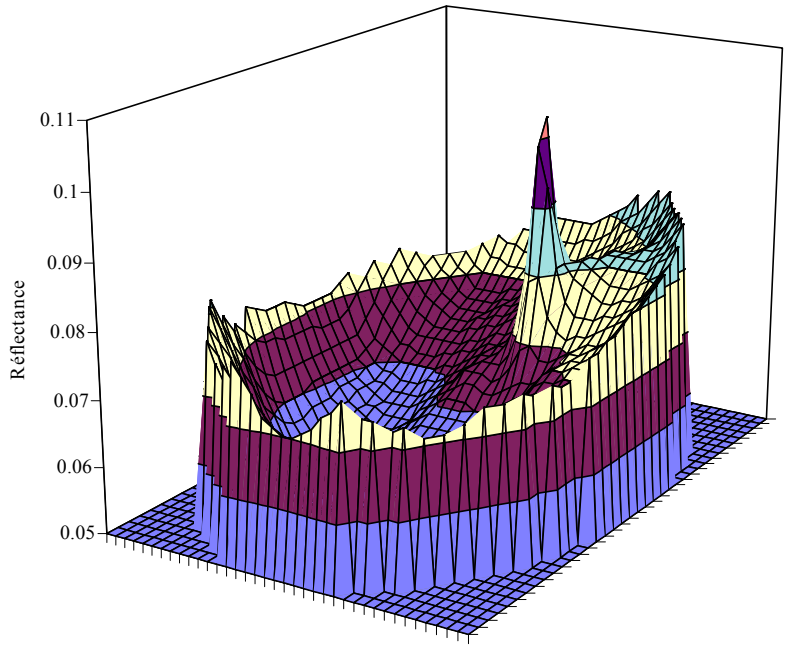


Figure 2-15: BRDF d'une parcelle forestière simulée avec le modèle DART dans le domaine spectral du vert.

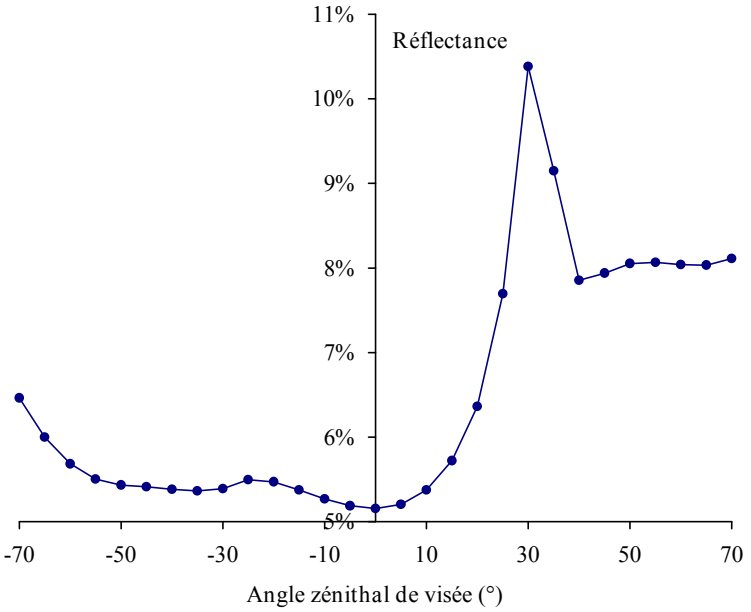
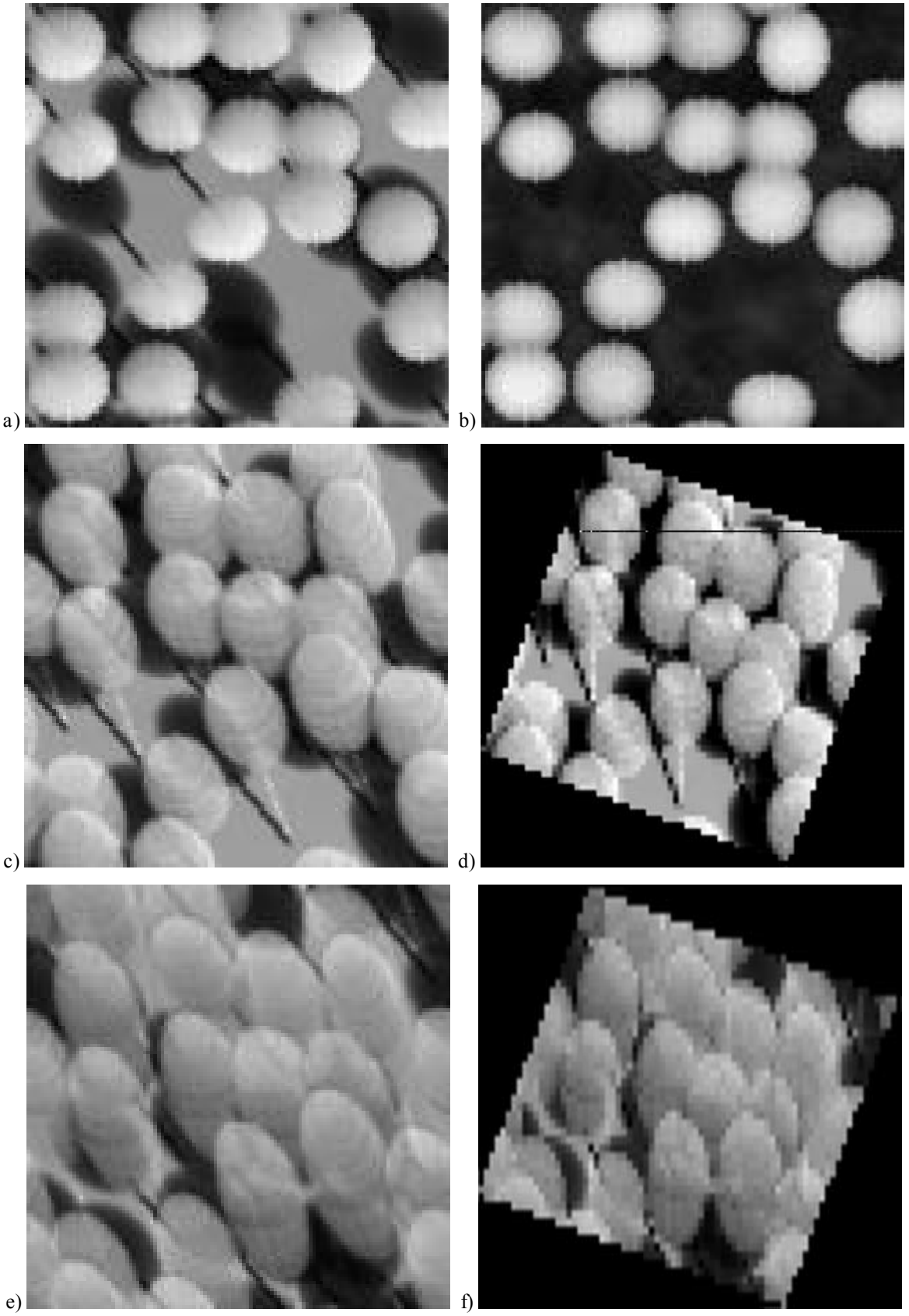


Figure 2-16: Profil de réflectance d'une parcelle forestière simulée avec le modèle DART dans le domaine spectral du vert et dans le plan azimutal 222°

La figure 2-17 présente des simulations DART de la parcelle dans le domaine spectral du vert pour différentes configurations d'illumination et d'observation.



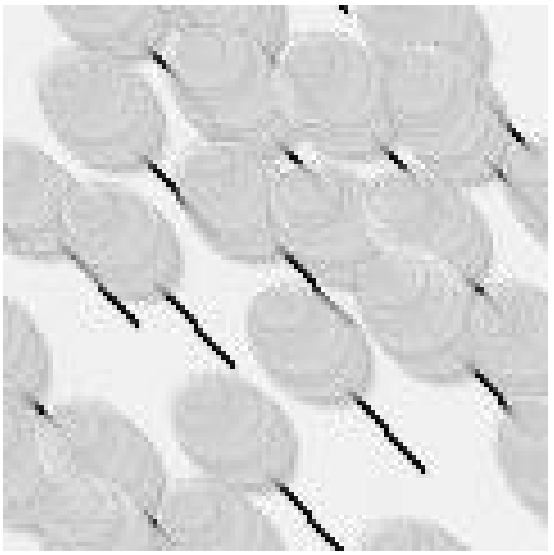
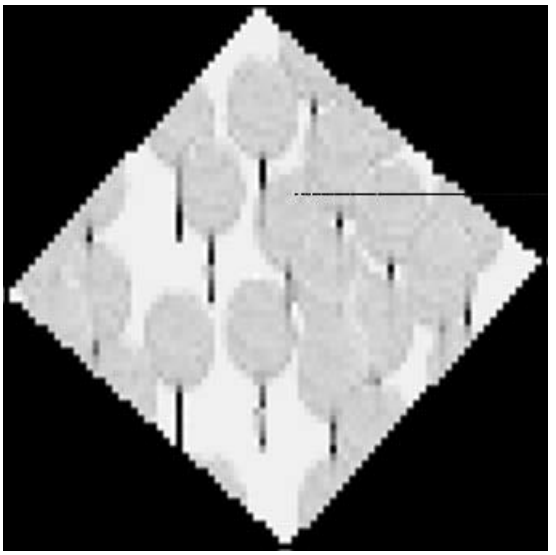
g)  h) 

Figure 2-17: Simulations DART d'une parcelle forestière (vert) pour différentes configurations de visée ($_v$; $_v$): (a,b) nadir, (c,d) 31.2°;200°), (e,f) 48°;200°) et (g,h) rétrodiffusion 31.2°;222°). (d,f,h) ont été corrigées géométriquement. Illumination: $_s$=148.8° $_s$=42°, SKYL=25% sauf pour (b) où SKYL=100%.

Les réflectances moyennes (%) (Tableau 2-6) associées à différents types d'éléments (couronne, sous-bois, etc.), ont été calculées en fonction du domaine spectral (vert, rouge, proche infrarouge) sur les simulations au nadir et pour différentes configurations d'illumination: illumination solaire (SKYL=0%), atmosphérique (SKYL=100%) et mixte (SKYL=25% dans le vert, 20% dans le rouge et 15% dans le proche infrarouge).

Pour toutes les configurations d'illumination (illumination solaire, atmosphérique et mixte), la réflectance moyenne de la scène au nadir est de l'ordre de 6%, 2.5% et 35% respectivement dans le vert, le rouge et le proche infrarouge. Ces réflectances sont nettement inférieures aux réflectances foliaires (15%, 5% et 45% dans le vert, le rouge et le proche infrarouge). L'importance de cette diminution est directement liée à la structure hétérogène du couvert.

Dans le cas d'une illumination mixte, c'est à dire comprenant à la fois du rayonnement direct solaire et du rayonnement diffus atmosphérique, et pour une visée à la verticale (Fig. 2-16a), la réflectances des surfaces de sous-bois à l'ombre est 4 fois plus faible (dans le rouge) que celle du sous-bois directement éclairé. La réflectance est d'autant plus faible que l'ombre correspond à la superposition de plusieurs ombres de houppiers. La réflectance des couronnes des arbres est toujours supérieure à la réflectance du sous-bois (Tableau 2-6). En effet, le LAI n'étant pas très élevé (1.59) sur la parcelle, les houppiers ne sont pas totalement opaques. Le rayonnement réfléchi par les pixels « couronne » correspond donc à la contribution du rayonnement diffusé par les éléments foliaires du houppier mais aussi du rayonnement diffusé par le sous-bois. La réflectance des pixels « couronne » diminue (Tableau 2-6) dans le cas où (1) le sous-bois sous la couronne est à l'ombre mais aussi dans le cas où (2) les pixels « couronne » correspondent à la superposition de plusieurs houppiers. En effet, dans ce dernier cas, les densités volumiques foliaires s'ajoutent entraînant une opacité plus grande des couronnes et ainsi, une diminution de la contribution du rayonnement diffusé par le sous-bois.

La figure 2-17b correspond à la même simulation mais pour une illumination avec uniquement du rayonnement diffus atmosphérique isotrope. Les ombres des arbres ont presque disparu. Elles sont dues au fait que l'atmosphère est représentée par un nombre fini de directions, c'est à dire dans notre cas 46 directions. Elles seraient évidemment beaucoup

plus marquées si l'atmosphère était anisotrope.

La figure 2-17c correspond à une simulation dans le domaine spectral du vert, pour une configuration angulaire d'observation égale à θ_v=31.2° et ϕ_v=200°. Les ombres des troncs sont orientées selon la direction azimutale d'illumination, alors que les troncs sont orientés selon la direction azimutale d'observation. La réflectance totale de la scène est plus importante dans cette configuration angulaire d'observation que celle obtenue au nadir (Tableau 2-7). En effet, en visée oblique, la proportion de sous-bois à l'ombre directement visible est beaucoup plus faible alors que la proportion de couronne augmente. La réflectance moyenne des couronnes (Tableau 2-6) étant plus élevée que celle du sous-bois, la réflectance totale de la scène a ainsi tendance à augmenter. Cet effet est d'autant plus important que la visée est à l'oblique. La réflectance de la scène observée avec un même angle azimutal mais pour un angle zénithal de 48° (Fig. 2-16e), est plus élevée ; elle est alors égale à 7.28% (Tableau 2-7).

L'image Fig. 2-16g est une simulation pour la direction d'observation correspondant à la configuration de rétrodiffusion ou « hot-spot ». On vérifie d'une part l'absence d'ombres portées au sol et d'autre part, que la réflectance du sous-bois (12.13%) et des couronnes (14.00%) atteignent des valeurs maximales. Ces deux effets combinés expliquent pourquoi la réflectance de la scène (11.05%) est maximale dans cette direction par rapport aux autres configurations angulaires de visée ; elle vaut près de 2 fois la réflectance de la scène au nadir (Tableau 2-7). La configuration angulaire de rétrodiffusion est de toute évidence d'une grande importance pour étudier la structure de la canopée car la réflectance dans cette direction, dépend fortement de la taille et de la forme des éléments foliaires ainsi que de la densité des arbres dans le couvert. Ce point sera sans aucun doute exploité avec les nouveaux capteurs directionnels tels que POLDER.

Les images de la figure 2-17c, 2-17e et 2-17g ne correspondent pas à des images réelles acquises par un capteur au-dessus de la canopée selon la direction d'observation (Ω_v). En effet, de telles simulations nécessitent une projection des cellules de la couche supérieure de la maquette sur un plan perpendiculaire à la direction de visée (Ω_v). Les images de la figure 2-17d, 2-17f et 2-17h résultent de cette projection. Ainsi, les scènes rectangulaires sont transformées en losange dont les dimensions dépendent de la direction d'observation.

Le tableau 2-6 illustre l'influence relative des différents éléments (sous-bois, couronne) sur la réflectance de la scène au nadir en fonction de différents types d'illumination. On remarque que d'une manière générale, la réflectance du sous-bois est plus forte dans le cas d'une illumination solaire que dans le cas d'une illumination comprenant du rayonnement atmosphérique. Cette tendance est inversée pour les couronnes des arbres. En effet, compte tenu des taux de couverture considéré, le rayonnement solaire direct pénètre plus facilement la canopée que le rayonnement atmosphérique. Ce dernier est davantage intercepté par les couches supérieures du feuillage.

La figure 2-18 présente des simulations directionnelles de la parcelle forestière. Les configurations d'observation correspondent à un même angle zénithal de 31.2° et à divers angles azimutaux. Les simulations ont été effectuées dans le vert avec une illumination solaire. On constate une forte variabilité de la réflectance en fonction de la configuration angulaire d'observation. En effet, la réflectance varie entre 5.36% et 11.05%. Ces deux configurations extrêmes correspondent respectivement à la rétrodiffusion et à la direction spéculaire.

Type d'illumination		Solaire	Mixte	Atmosph.
SKYL		0	]0..1[	1
Scène entière		V: 5.94 R: 2.73 PIR: 36.58	V: 5.70 R: 2.39 PIR: 34.82	V: 5.81 R: 2.44 PIR: 37.27
Sous-bois	éclairé	V: 8.06 R: 4.54 PIR: 42.94	V: 6.37 R: 3.66 PIR: 36.14	
	à l'ombre d'un arbre	V: 1.91 R: 1.09 PIR: 17.91	V: 1.95 R: 0.93 PIR: 16.39	V: 3.12 R: 1.66 PIR: 23.70
	à l'ombre de plusieurs arbres	V: 1.39 R: 0.65 PIR: 15.23	V: 1.32 R: 0.52 PIR: 13.05	
Couronne	sur sous-bois éclairé	V: 9.04 R: 3.32 PIR: 50.49	V: 9.18 R: 3.32 PIR: 50.85	
	sur sous-bois à l'ombre d'un arbre	V: 7.48 R: 2.73 PIR: 43.74	V: 8.04 R: 2.75 PIR: 46.47	V: 9.27 R: 3.54 PIR: 55.00
	sur sous-bois à l'ombre de plusieurs arbres	V: 6.80 R: 2.18 PIR: 40.31	V: 7.31 R: 2.44 PIR: 44.16	
Superposition de plusieurs couronnes		V: 6.42 R: 2.16 PIR: 45.25	V: 6.73 R: 2.21 PIR: 45.73	V: 7.91 R: 2.89 PIR: 53.46

Tableau 2-6: Réflectances DART moyennes (%) de différents éléments d'une parcelle forestière au nadir pour différentes configurations d'illumination et dans les domaines spectraux du vert, rouge et proche infrarouge.

Simulation dans le vert	$_v$=0°	$_v$=0°	$_v$=0°	$_v$=31.2° $_v$=200°	$_v$=31.2° $_v$=222°	$_v$=48° $_v$=200°
SKYL	0	0.25	1	0.25	0	0.25
Réflectance totale (%)	5.94	5.70	5.81	6.92	11.05	7.28

Tableau 2-7: Réflectances DART moyennes (%) d'une parcelle pour différentes configurations d'illumination et d'observation dans le domaine spectral du vert.

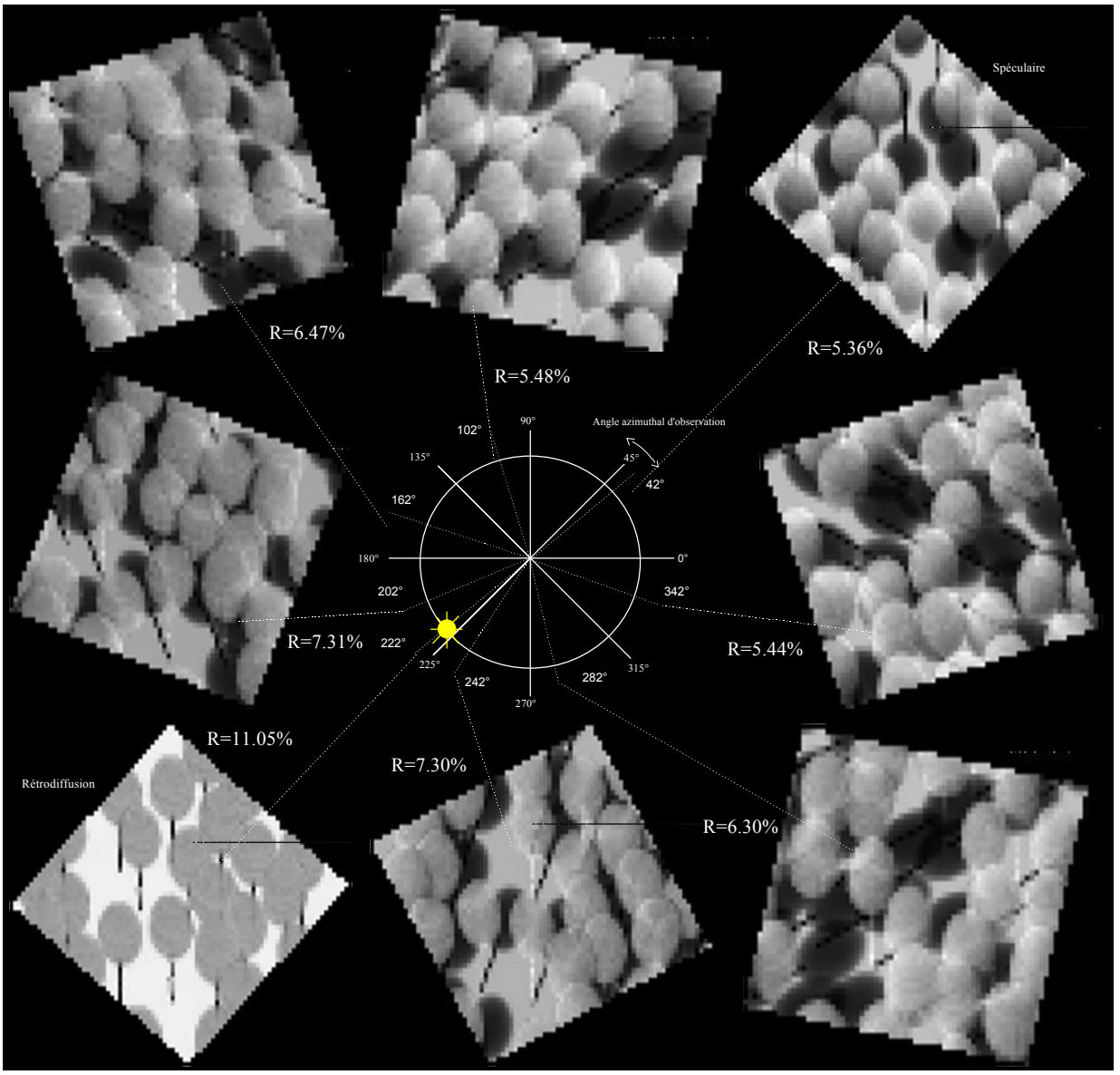


Figure 2-18: Simulations DART d'une même parcelle forestière pour différentes configurations d'observation (même angle zénithal 31.2° et différents angles azimutaux) dans le domaine spectral du vert et pour une illumination solaire. Les images ont été corrigées géométriquement.

II.3. Simulation d'images au niveau du capteur:Couplage DART/6S

Les images de réflectance obtenues en sortie du modèle DART correspondent à des simulations au niveau de la canopée. La simulation des mêmes images au niveau du capteur, nécessite la prise en compte de la couche atmosphérique située entre la végétation et le capteur aéroporté ou satellitaire. Cette couche d'atmosphère modifie le signal reçu par le capteur en perturbant certaines propriétés physiques du rayonnement électromagnétique.

Les perturbations atmosphériques dépendent entre autres de la longueur d'onde (Fig. 2-18) et de la réflectance de la surface terrestre. Elles sont liées aux molécules gazeuses et aux particules liquides ou solides (aérosols) qui sont en suspension dans l'air. Ces dernières absorbent, diffusent ou réfractent le rayonnement. L'atmosphère se présente comme un milieu stratifié où la répartition des gaz et des aérosols varie dans l'espace et dans le temps. Elle affecte donc de façon très variable les mesures de télédétection.

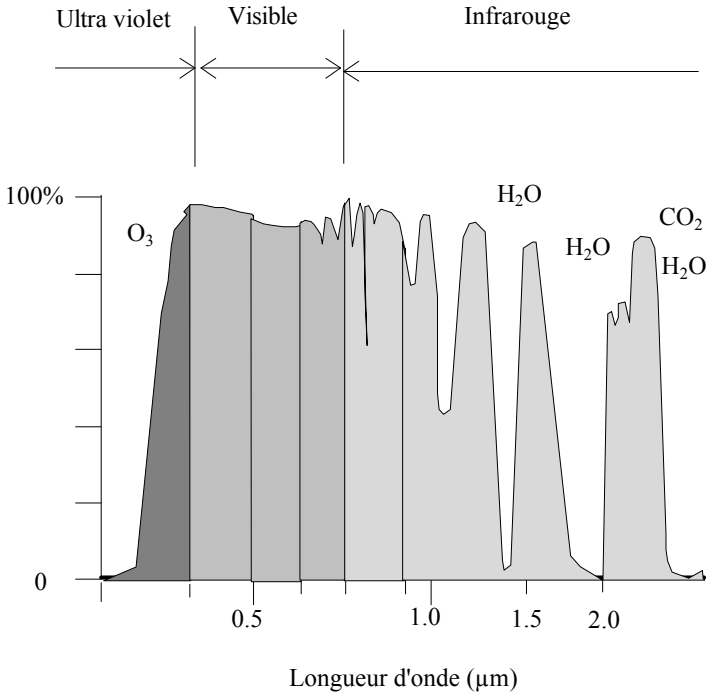


Figure 2-19:
Transmission atmosphérique dans le visible et le proche infrarouge.

La simulation des images au niveau du capteur a été réalisé en effectuant un couplage simple entre le modèle DART et un modèle atmosphérique appelé 6S qui est une amélioration récente du modèle 5S (Concepts physiques: Tanré et al., 1979 ; Présentation du logiciel: Tanré et al., 1990). Selon Tanré et al. (1990), la réflectance de la cible observée par le capteur est donnée par:

$$\rho^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv}) = [\rho_a(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv}) + \rho_c^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv}) + \rho_e^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv})].\,T_{gaz}(\theta_s,\theta_v)$$

$$= [\rho_a(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv}) + \rho_c.\frac{T(\theta_s)}{1-<\rho_e>.s}.e^{-\frac{\tau}{\mu_v}} + <\rho_e>.\frac{T(\theta_s)}{1-<\rho_e>.s}.t_d(\theta_v)].\,T_{gaz}(\theta_s,\theta_v)$$

avec:

$\rho^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv})$: le facteur de réflectance apparente de la surface observée par le capteur. Il est défini par l'expression suivante:

$$\rho^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv}) = \frac{\pi.L}{\mu_s.E_s}$$

où L est la luminance apparente mesurée au niveau du capteur et E_s est la constante solaire au sommet de l'atmosphère.

μ_s, μ_v: le cosinus des angles zénithaux d'éclairement θ_s et d'observation θ_v.

Ψ_{sv} : l'angle azimutal relatif entre les directions d'éclairement et d'observation.

$\rho_a(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv})$: la réflectance intrinsèque de l'atmosphère.

$\rho_c^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv})$: le facteur de réflectance apparente « direct », lié en partie à la contribution de l'environnement.

$$\rho_c^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv}) = \frac{\pi . L_c}{\mu_s . E_s} = \rho_c . \frac{T(\theta_s)}{1- < \rho_e > . s} . e^{-\frac{\tau}{\mu_v}}$$

$\rho_e^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv})$: le facteur de réflectance apparente « direct » lié à la contribution de l'environnement uniquement.

$$\rho_e^*(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv}) = \frac{\pi . L_c}{\mu_s . E_s} = \quad < \rho_e > . \frac{T(\theta_s)}{1- < \rho_e > . s} . t_d(\theta_v)$$

$\rho_c, < \rho_e >$: la réflectance de la cible et la réflectance moyenne de l'environnement. La réflectance de la cible correspond à la réflectance calculée avec le modèle DART. La réflectance moyenne de l'environnement dépend nécessairement des réflectances des éléments de surface entourant la cible et des propriétés optiques de l'atmosphère, mais aussi de la distance entre ces éléments de surface et la cible.

$\frac{T(\theta_s)}{1- < \rho_e > . s}$: la transmittance totale (directe et diffuse) selon la direction incidente (soleil → surfaces terrestres). Les interactions successives entre le sol et l'atmosphère sont prises en compte par le facteur ($\frac{1}{1- < \rho_e > . s}$), où s représente l'albédo sphérique de l'atmosphère, c'est à dire le coefficient de rétrodiffusion atmosphérique.

$e^{-\frac{\tau}{\mu_v}}, t_d(\theta_v)$: les transmittances atmosphériques directe et diffuse, selon la direction d'observation (surfaces terrestres → capteur). τ est l'épaisseur optique de l'atmosphère à la verticale, l'absorption par les gaz n'étant pas prise en compte dans ce terme.

$T_{gaz}(\theta_s,\theta_v)$: la transmittivité totale des gaz atmosphériques (H_2O, O_2, CO_2, O_3, etc.) selon les directions d'éclairement et d'observation (soleil → surfaces terrestres et surfaces terrestres→ capteur).

Le modèle atmosphérique 6S a été utilisé pour calculer les paramètres atmosphériques ($T(\theta_s)$, s, $\rho_a(\theta_s,\theta_v,\Psi_{sv})$, $e^{-\frac{\tau}{\mu_v}}$, $t_d(\theta_v)$, $T_{gaz}(\theta_s,\theta_v)$) caractéristiques de l'atmosphère et nécessaires à la transformation des simulations DART au niveau du capteur. Ce modèle opère dans le domaine spectral allant de 0.25 µm à 4µm. Les principales contraintes proviennent des configurations angulaires solaire et d'observation qui sont limitées à des angles zénithaux respectivement inférieurs à 60° et 50° et de la visibilité qui doit être supérieure à 5 km. Les paramètres atmosphériques sont calculés à partir de paramètres d'entrée qui sont:

- la configuration angulaire solaire (θ_s,ϕ_s) et d'observation (θ_v,ϕ_v), et la date (Jour, Mois) ou bien, letype de capteur(Météosat, AVHRR, SPOT HRV, Landsat , etc.)
- le modèle atmosphérique des gaz (pas d'absorption, modèle tropical, modèle mid-latitude été ou hiver, modèle subarctique été ou hiver, profil atmosphérique résultant de mesures, etc.),
- le modèle atmosphérique des aérosols (pas d'aérosols, modèle continental, modèle

maritime, modèle urbain, modèle désert, modèle stratosphérique, etc.),

- la distance de visibilité horizontale V,
- l'altitude de la cible H_{cible} et l'altitude du capteur $H_{capteur}$ si celui-ci est un instrument aéroporté,
- les concentrations en H_2O et O_3 si celles-ci sont disponibles,
- l'épaisseur optique des aérosols à 550nm $\tau_{aer}(550)$ si celle-ci est disponible,
- le domaine spectral $[\lambda_{inf}\ \lambda_{sup}]$.

Le calcul des paramètres caractéristiques de l'atmosphère nécessaires à la transformation des simulations a été réalisé pour une configuration expérimentale indiquée par le tableau 2-8.

Configuration angulaire solaire	$\theta_s = 31.48°$ et $\phi_s = 147.21°$
Configuration angulaire de visée	nadir
Date	7 Mai 1993
Modèle atmosphérique des gaz	Mid-latitude été
Modèle atmosphérique des aérosols	Continental
Visibilité	V = 15 km
Altitudes	H_{cible} = 15 m $H_{capteur}$ = 3 km
$[H_2O]$, $[O_3]$ et $t_{aer}(550)$	non disponibles
Domaine spectral	Vert: 550 nm Rouge: 660 nm Proche infrarouge: 800nm

Tableau 2-8: Exemples de conditions expérimentales pour le calcul de paramètres caractéristiques de l'atmosphère avec le logiciel 6S (Tanré et al., 1990).

La réflectance moyenne de l'environnement $< \rho_e >$ est le seul paramètre qui n'a pas été calculé avec le modèle 6S mais à partir des simulations directionnelles DART de la scène. En effet, les simulations ont été effectuées en considérant que tout ce qui se trouve autour de cette scène est identique à la scène elle-même. La réflectance de l'environnement correspond donc à la réflectance moyenne de la scène ; la moyenne étant effectuée pour tous les pixels de l'image mais aussi pour toutes les directions d'observation puisque la contribution de l'environnement provient de toutes les directions de l'espace. Les directions de propagation du rayonnement étant discrétisées, la réflectance de l'environnement est:

$$< \rho_e > \ = \ \frac{1}{\pi} . \sum_{n=1}^{N''} \frac{1}{N_{pix}} \sum_{p=1}^{N_{pix}} \rho_c(p,n) . \cos(\theta_n) . \Delta\Omega_n ,$$

où $\rho_c(p,n)$ est la réflectance d'une cellule élémentaire p de la couche supérieure de la scène pour la direction d'observation n, N'' est le nombre de directions montantes ($\theta < 90°$) et N_{pix} est le nombre de cellules élémentaires d'une couche horizontale. Ce dernier est équivalent à $N_{pix} = \frac{\Delta X . \Delta Y}{\Delta x . \Delta y}$.

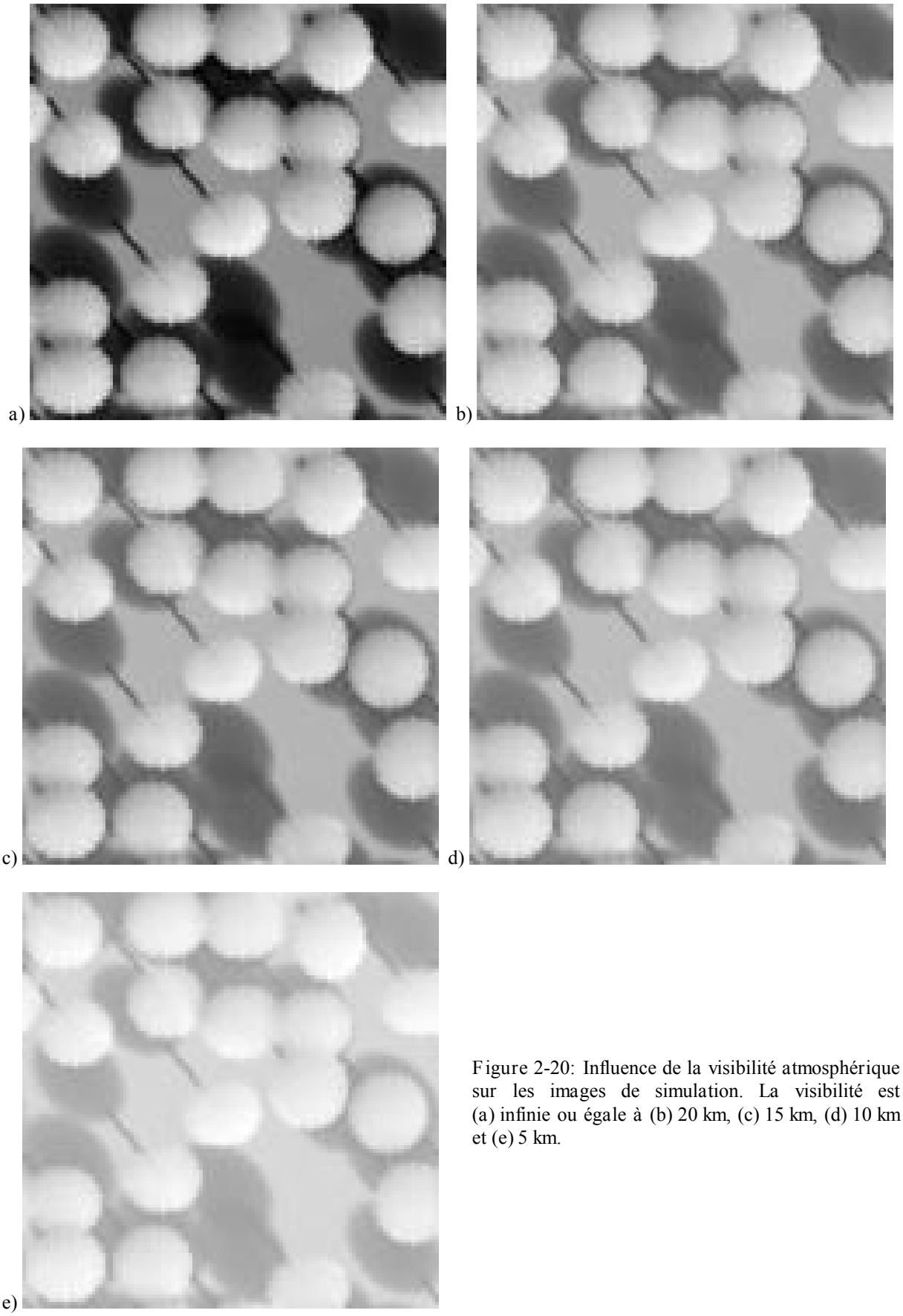


Figure 2-20: Influence de la visibilité atmosphérique sur les images de simulation. La visibilité est (a) infinie ou égale à (b) 20 km, (c) 15 km, (d) 10 km et (e) 5 km.

La figure 2-20 montre des images de réflectance simulées au niveau du capteur pour différentes visibilités atmosphériques variant de 5 à 20 km. Les images présentées ont été

simulées dans le domaine spectral du vert (550 nm). Les paramètres atmosphériques calculés avec le logiciel 6S pour une configuration angulaire de visée au nadir, sont mentionnées dans le tableau 2-9. La réflectance de l'environnement correspond dans ce cas d'étude à $< \rho_e > = 6.61\%$. Les différentes images résultant du couplage, ont été codées de la même façon ; le même niveau de gris correspond à la même valeur de la réflectance pour toutes les images. L'image 2-18a est la simulation en sortie directe du modèle DART, c'est à dire sans influence de l'atmosphère (visibilité infinie).

Visibilité		20 km	15 km	10 km	5 km
T_s	1.000	0.879	0.864	0.834	0.748
s	0.000	0.131	0.140	0.155	0.191
r_a	0.00%	2.42%	2.71%	3.32%	5.13%
t_d	0.000	0.151	0.176	0.223	0.330
T_{gaz}	1.000	0.969	0.969	0.969	0.969

Tableau 2-9: Influence de la visibilité atmosphérique sur des paramètres atmosphériques, calculés avec le modèle 6S dans le domaine spectral du vert et pour une configuration angulaire d'observation au nadir.

Visibilité			20 km	15 km	10 km	5 km
Scène entière		5.70	7.08	7.27	7.64	8.79
Sous-bois	éclairé	6.37	6.86	7.70	8.02	9.04
	à l'ombre d'un arbre	1.95	5.03	4.95	5.60	7.38
	à l'ombre de plusieurs arbres	1.32	4.39	4.56	5.25	7.14
Couronne	sur sous-bois éclairé	9.18	9.67	9.33	9.46	10.03
	sur sous-bois à l'ombre d'un arbre	8.04	8.37	8.24	8.50	9.37
	sur sous-bois à l'ombre de plusieurs arbres	7.31	8.00	7.82	8.13	9.11
Superposition de plusieurs couronnes		6.73	8.12	7.98	8.26	9.21

Tableau 2-10: Influence de la visibilité atmosphérique sur la réflectance d'une parcelle .

On constate que la réflectance de la scène (Tableau 2-10) augmente fortement avec une visibilité décroissante, c'est à dire une atmosphère de plus en plus « épaisse ». En effet, pour une visibilité de 5 km, la réflectance totale de la scène augmente de 54.2% par rapport à la scène « sans atmosphère ». D'autre part, on remarque que les différences relatives entre différentes zones de l'image diminuent avec la visibilité. La différence relative de réflectance entre les « couronnes sur sous-bois éclairé » et le « sous-bois à l'ombre » sont égales à 370.8%, 92.2%, 88.5%, 68.9% et 39.6% respectivement pour des visibilités égales à l'infini, 20, 15, 10 et 5 km. Cet exemple illustre le fait que l'atmosphère à tendance à augmenter la réflectance des surfaces « sombres » et diminuer les écarts de réflectances entre ces surfaces.

Dans le visible et le proche infrarouge, l'atmosphère joue deux rôles: (1) elle intercepte et donc atténue le rayonnement réfléchi par les surfaces terrestres (« effet multiplicatif ») et (2) elle rajoute un rayonnement « parasite » (« effet additif »). Les effets d'environnement seront négligés dans la suite du texte par souci de simplification pour la compréhension. On a donc:

$$L^*_{capteur} = T.L_o + L_a ,$$

où L_o est la luminance d'une surface au sol, $L^*_{capteur}$ est la luminance de cette surface observée par le capteur, L_a est la luminance atmosphérique et T est la transmittance de l'atmosphère.

Dans le cas où l'on observe deux surfaces de type différent, on obtient:

$$\begin{aligned} L^*_{capteur,1} &= T.L_1 + L_a \\ L^*_{capteur,2} &= T.L_2 + L_a \end{aligned} .$$

On peut à partir de ces formules, calculer un indice de contraste $C_{capteur}$ qui définit la différence relative de luminance des deux surfaces 1 et au niveau du capteur:

$$C_{capteur} = \frac{L^*_{capteur,1} - L^*_{capteur,2}}{L^*_{capteur,1}} = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + \frac{L_a}{T}} .$$

Sans atmosphère, l'indice C équivalent est égal à $C = \frac{L_1 - L_2}{L_1}$. Le rapport de ces deux indices $\frac{C_{capteur}}{C}$ est toujours inférieur à 1. Ce cas d'étude illustre de manière simple que l'atmosphère diminue le contraste des images. Ce contraste est d'autant plus diminué que la transmittance de l'atmosphère T est faible. La réduction du contraste se traduit par conséquent, par une diminution de la dynamique de l'histogramme des images (Fig. 2-20).

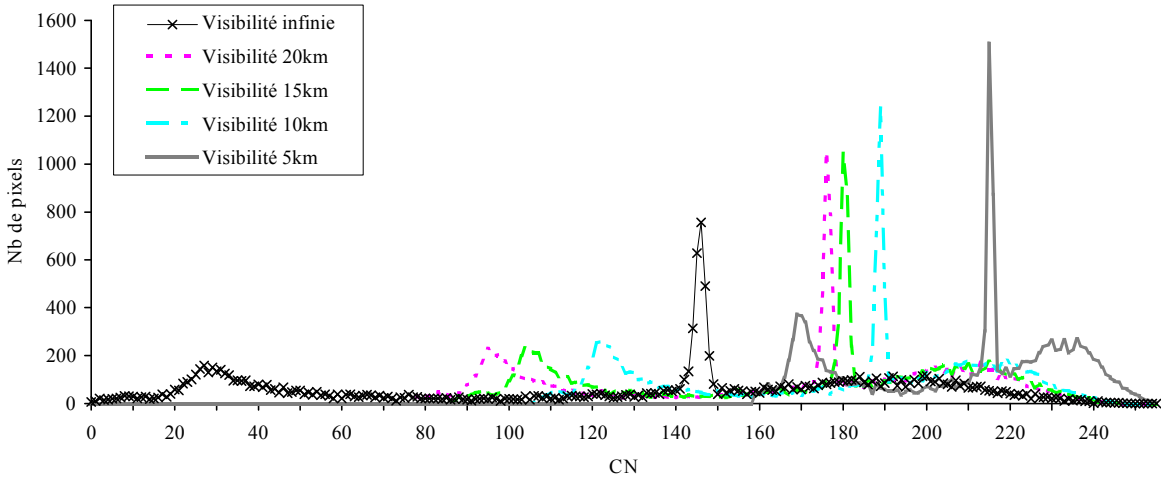


Figure 2-21: Histogrammes des images résultant du couplage DART/ 6S pour 5 visibilités atmosphériques.

III. CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Le modèle DART a été développé pour simuler le transfert radiatif et par conséquent la BRDF dans les milieux hétérogènes, tout en ayant à l'esprit deux objectifs majeurs: (1) mieux comprendre l'information potentielle liée aux caractéristiques biophysiques et biochimiques des couverts végétaux à partir des données de télédétection, et (2) développer un modèle qui puisse fournir une information utile sur le fonctionnement de la végétation en vue d'études futures. Ce deuxième objectif ne sera pas abordé au cours de cette thèse.

Le modèle DART est un outil « physique » qui peut améliorer la compréhension et l'interprétation des données de télédétection (ex.: meilleure détermination de l'albédo des

surfaces terrestres). Il permet de simuler des scènes comprenant différents types d'éléments (sol, herbe, tronc, éléments foliaires) disposés dans l'espace de manière quelconque. La topographie est prise en compte. Les principaux mécanismes physiques (polarisation, illumination par une atmosphère anisotrope, hot-spot, etc.) sont également modélisés. La simulation de la polarisation ne prend pas en compte l'état de polarisation du rayonnement incident. Seule la polarisation d'ordre 1 est simulée. Le nombre et l'orientation des directions de propagation du rayonnement ainsi que la discrétisation horizontale et verticale de la scène sont choisis par l'opérateur. Le modèle peut être considéré comme « statistique » car les cellules d'éléments foliaires sont assimilés à un milieu turbide, mais également « déterministe » car les objets contenus dans la scène sont définis par leur forme et leur distribution spatiale. L'approche « déterministe » est fondamentale car elle permet d'obtenir des simulations réalistes et précises du transfert radiatif dans les milieux hétérogènes. Un autre avantage important du modèle DART est qu'il permet de distinguer les composantes du rayonnement qui prennent ou ne prennent pas en compte l'information liée à la diffusion volumique foliaire. Ceci est intéressant pour étudier la biochimie des couverts végétaux à partir de données de télédétection. Enfin, la possibilité de simuler des images spectrales directionnelles est un autre point fort du modèle DART ; en particulier, si l'on veut déterminer à partir de données de télédétection la distribution spatiale des caractéristiques biophysiques et biochimiques des couverts végétaux. De plus, le modèle DART permet de quantifier facilement l'influence de divers paramètres sur la réflectance moyenne d'une scène. Ces paramètres peuvent être par exemple le type d'illumination (illumination solaire, atmosphérique ou mixte), la configuration angulaire d'illumination et d'observation, la structure du couvert, le LAI ou les paramètres optiques du couvert, etc.

Une série de simulations a permis de montrer la validité de l'approche discrète, c'est à dire la discrétisation de l'espace et des directions. En effet, les résultats obtenus convergent bien.

Enfin, un couplage simple entre le modèle DART et le modèle atmosphérique 6S a été effectué dans le but de prendre en compte l'atmosphère. Cette approche permet de simuler des images non plus au niveau de la canopée mais au niveau du capteur aéroporté ou satellitaire.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION ET TEXTURE D'UN COUVERT FORESTIER

I. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet de montrer l'intérêt de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude de l'information texturale d'images de plantations forestières acquises par télédétection à haute résolution spatiale. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'influence des paramètres structuraux tels que les dimensions des arbres, l'espacement entre les rangées, l'indice foliaire, etc.

Après avoir défini les principales formulations mathématiques permettant de décrire et de quantifier le comportement textural d'une image, nous mettrons en évidence la sensibilité de l'information texturale à certains paramètres structuraux compte tenu des configurations d'illumination et d'observation d'une scène.

D'autre part, nous déterminerons la sensibilité de l'information texturale en fonction de l'échelle d'analyse. Ces travaux théoriques seront testés avec l'analyse de données multi-spectrales acquises par l'instrument Push-Broom « RAMI » aéroporté (simulateur SPOT) au-dessus des Landes dans le Sud Ouest de la France.

L'information spatiale joue un rôle majeur dans l'interprétation d'images de couverts forestiers acquises par télédétection à haute résolution spatiale. Les photo-interprètes estiment par exemple, la hauteur du couvert ou la densité d'arbres dans les parcelles forestières à l'aide de lois empiriques entre l'organisation spatiale de la canopée et la texture des images. Naturellement, l'établissement de relations fiables est difficile compte tenu de la complexité des variations existantes entre d'une part le signal et d'autre part les caractéristiques structurales du couvert et les paramètres d'acquisition. Jusqu'à présent, deux types d'approches ont été utilisées pour comprendre l'origine des variations spatiales observées au niveau des images. Ces approches sont soit « empiriques » (Ramstein et Raffy, 1989 ; Guyon et al., 1994), soit basées sur « l'utilisation de modèles » (Saint-Onge et Cavayas, 1995 ; Woodcock et al., 1988a ; Jupp et al., 1989).

La majeure limitation de l'approche empirique repose sur le fait qu'elle nécessite de nombreux jeux de données caractérisées par une grande dynamique des paramètres étudiés. En effet, les relations recherchées sont d'autant plus robustes et générales que leur élaboration est établie à partir d'images provenant de sites de différentes natures où seul le paramètre biophysique recherché varie. D'une manière générale, la variabilité naturelle des milieux forestiers ne permet pas de disposer de tels ensembles de sites. Les relations empiriques recherchées doivent alors être établies à partir d'analyses multivariables. Cette approche requiert la connaissance de nombreux paramètres autres que le ou les paramètres étudiés. Il est donc nécessaire de conduire des mesures de terrain intensives et précises. En fait, ces mesures sont souvent difficilement réalisables de par leur coût, leur durée de mise en oeuvre et l'imprécision due aux instruments de mesure et aux conditions d'acquisition. Les contraintes mentionnées ci-dessus expliquent l'intérêt d'utiliser des images simulées de couverts car tous les paramètres structuraux du couvert sont alors directement contrôlés. Cette approche a déjà été utilisée par Saint-Onge et Cavayas, (1995) pour estimer la hauteur des arbres et le volume sur pied (biomasse) de parcelles forestières. Ces auteurs ont cependant utilisé un modèle géométrique (Granberg, 1987) qui repose sur de nombreuses simplifications du transfert radiatif dans la canopée, en particulier pour ce qui est des diffusions d'ordre 1 et multiples. Les couronnes des arbres sont par exemple, considérées comme des éléments parfaitement opaques et les diffusions multiples entre les éléments foliaires de la canopée sont négligées. Différents travaux (Gastellu-Etchegorry et al, 1996b ; Li et al, 1995) ont montré qu'une telle approximation peut entraîner des erreurs relativement importantes sur les réflectances

simulées, et par suite sur l'information texturale associée. Dans notre cas d'étude, l'utilisation du modèle DART permet de minimiser ces erreurs et ainsi de simuler avec une beaucoup plus grande précision l'information texturale de couverts forestiers.

II. SITE D'ETUDE ET DONNEES DE TELEDETECTION

II.1. Description du site d'étude: Forêt de Nézer, Les Landes, France

Le site forestier étudié se situe dans le massif forestier des « Landes de Gascogne » (Sud Ouest de la France) au sud du bassin d'Arcachon. Ce massif est installé sur un plateau de faible altitude (≈ 50 m) et couvre environ un million d'hectares, ce qui représente 1/14 de la surface des forêts françaises. Son extension date du XIX^{ème} siècle. Il est essentiellement monospécifique avec des pins maritimes (Pinus pinaster). Son organisation en futaies régulières assure une très grande homogénéité spatiale de l'architecture des couverts. De plus, un mode de régénération artificielle par semis ou en bandes et un bon état sanitaire général accroissent cette homogénéité. La quasi-totalité du massif est destinée à la production de bois. Elle représente environ 20% de la production française.

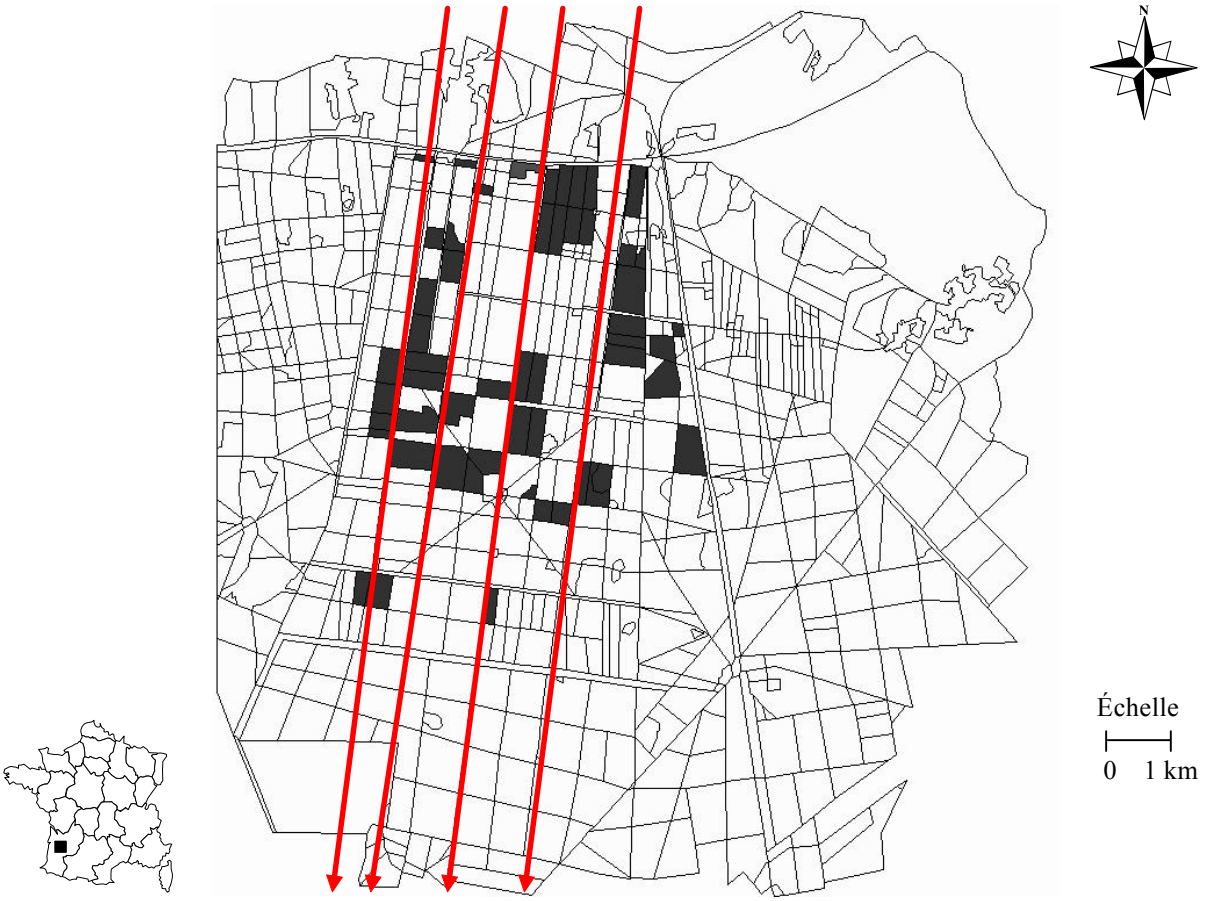


Figure 3-1: Parcellaire du site de Nézer. Les zones grisées indiquent les parcelles où l'indice foliaire a été mesuré. Les flèches représentent les 4 axes de vol du radiomètre aéroporté «RAMI », le 7 Mai 1993.

D'une manière plus précise, notre site d'étude (44°56' N - 1°02' E) correspond à la forêt de « Nézer ». Ce domaine de quelques milliers d'hectares, comprend plusieurs centaines de parcelles de pins le plus souvent de formes rectangulaires et de surface supérieure à 1 ha. L'âge des pins est constant pour chaque parcelle ; il est compris entre 0 et 50 ans. De nombreuses parcelles sont délimitées par des pare-feux ou de larges pistes. Ce parcellaire bien

marqué (Fig. 3-1) et la quasi-abscence de relief facilitent la conduite d'études par télédétection. L'altitude du site varie entre 13 et 17m.

Les caractéristiques des peuplements de pins tels que l'âge, la densité moyenne, les caractéristiques biophysiques moyennes (hauteur, diamètre des couronnes, etc.), les dates des coupes, etc. sont bien documentées (Tableau 3-1). De plus, nous avons effectué des mesures de LAI sur un grand nombre de parcelles (Fig. 3-1) avec l'instrument LAI-2000 Plant Canopy Analyser (LI-COR, 1991), ce qui a permis d'établir une loi empirique entre les âges des pins et l'indice foliaire (Fig. 3-2). Cette loi est conforme aux résultats de Kasischke et Christensen (1984): l'indice foliaire augmente jusqu'à l'âge de 20 ans environ, puis diminue légèrement, compte tenu du mode d'exploitation de la plantation. Des dépressages successifs sont en effet réalisés environ tous les 4 ans. La biomasse foliaire par arbre évoluant très peu à partir de 35 ans, alors que la densité d'arbres diminue, la biomasse foliaire de la parcelle décroît.

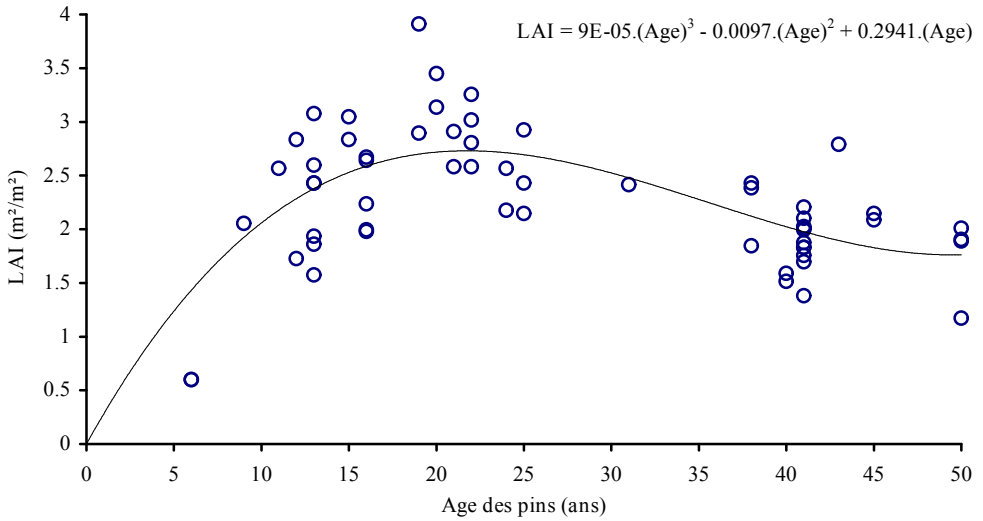


Figure 3-2: Relation empirique d'ordre 3 entre le LAI et l'âge des pins maritimes des parcelles.

Nom de la parcelle	P770	P650	P740	P1261	P191
Âge (ans)	12	13	19	20	40
Densité (nb/ha)	840	800	642	688	250
Hauteur (m)	8.9	10.00	12.84	13.13	21.00
du tronc (m)	0.13	0.15	0.20	0.22	0.35
Hauteur du tronc (m)	3.5	4.5	6.0	6.5	11.0
Forme de la couronne	Ellipsoïde	Ellipsoïde	Ellipsoïde	Ellipsoïde	Ellipsoïde
de la couronne (m)	2.5	3.0	3.5	3.5	5.5
LAI	2.835	2.2	1.8	3.45	1.59
LAD	Sphérique	Sphérique	Sphérique	Sphérique	Sphérique
Espace / arbres (m)	3.5	3.5	4.0	4.0	6.0

Tableau 3-1: Caractéristiques dendrométriques moyennes de 5 parcelles de pins de la forêt de Nézer en 1993.

La bonne connaissance de ce site a été mise à profit pour:

- tester la validité du modèle DART (cf. Chap. 2 et 3),
- étudier la sensibilité de l'information texturale aux caractéristiques biophysiques de la canopée (cf. §.IV.) et
- évaluer la sensibilité des spectres de réflectance haute résolution aux caractéristiques du couvert telles que les concentrations chimiques des aiguilles (lignine, matière azotée, cellulose, etc.) (cf. Chap4).

II.2. Données aéroportées «RAMI »

Les données de télédétection utilisées sont des données visibles et proche infrarouge à haute résolution spatiale. Elles ont été acquises par le radiomètre Push-Broom « RAMI » (simulateur SPOT) aéroporté du Centre National d'Études Spatiales (CNES). Cet instrument comporte des barrettes de 1728 détecteurs CCD (Charge Coupled Device). Le champ élémentaire associé à chaque détecteur est de 0.54 mrad et le champ total vaut 51°. Ce capteur opère avec deux bandes spectrales du visible (vert (C_1): [495 575 nm] et rouge (C_2): [615 665 nm]) et une bande du proche infrarouge (C_3: [775 865 nm]). Embarqué sur un Fokker, il a volé le 7 Mai 1993 à 10.73 HTU soit 12.73 H (Temps Civil) à une altitude de 3000 m. La résolution spatiale était de 1.67 m au nadir et 2.03 m sur les bords. Les quatre axes de vol faisaient un angle azimutal de 9° environ vers l'Est par rapport à la direction du Nord géographique (Fig.3-1).

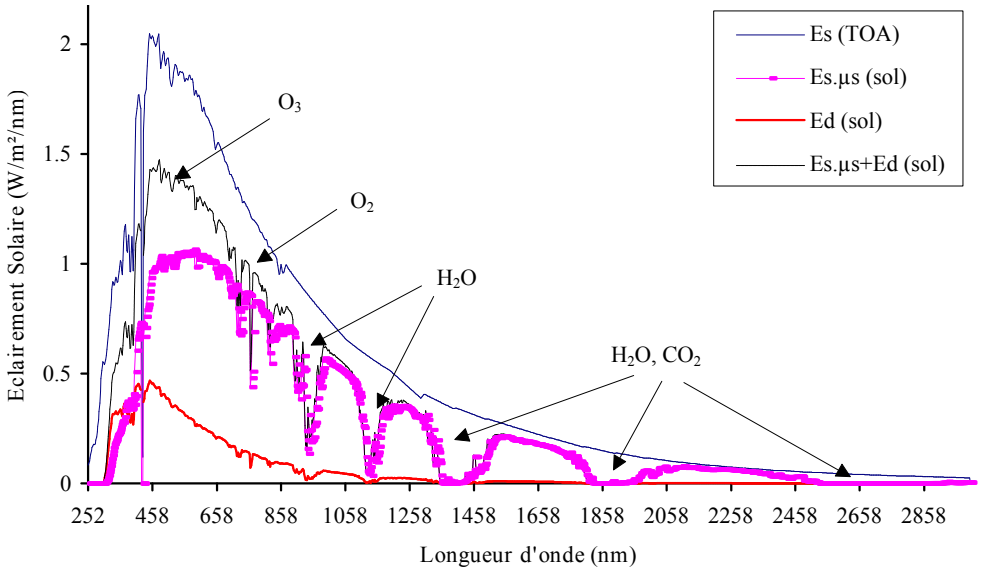


Figure 3-3: Éclairement solaire du 7 Mai 1993 (μ_s = 0.853). Les courbes indiquent l'éclairement au sommet de l'atmosphère (E_s) et au niveau de la surface terrestre (direct: $E_s.\mu_s$, diffus: E_d, total: $E_s.\mu_s+E_d$). Les principaux gaz absorbants sont indiqués.

	C_1: 495-575 nm	C_2: 615-665 nm	C_3: 775-865 nm
$E_s.\mu_s$ (TOA)	1.5955	1.3807	0.9208
$E_s.\mu_s$ (sol)	1.3731	1.0440	0.7058

Tableau 3-2: Éclairement solaire (W/m²/nm) au-dessus de l'atmosphère (TOA) et au niveau du sol dans les 3 bandes spectrales RAMI.

	C1: 495-575nm	C2: 615-665nm	C3: 775-865nm
Coefficient d'étalonnage	2.3628	2.5486	1.4597

Tableau 3-3: Coefficients d'étalonnage RAMI $C_{étalon}$ (m².sr.µm/W) dans les 3 canaux spectraux (axe de vol n°3).

Les angles zénithaux et azimutaux solaires ainsi que l'éclairement solaire (Fig. 3-3 et Tableau 3-2) ont été calculés à l'aide du logiciel 6S (Tanré et al., 1990). La configuration angulaire solaire était $\theta_s = 148.52°$ (angle off-nadir: 31.48°) et $\phi_s = 147.21°$. La visibilité au sol, donnée par le compte-rendu aérologique du jour de la station météorologique de Bordeaux Mérignac, était égale à 15 km. Le CNES a fourni des données RAMI rééchantillonnées à 1.67 m de résolution, corrigées des distorsions géométriques induites par le mouvement du vecteur et des différences de sensibilité entre détecteurs, ainsi que les coefficients d'étalonnage des 3 canaux spectraux, pour chaque axe de vol (Tableau 3-3).

II.3. Méthodologie de correction des données RAMI

L'atmosphère influence beaucoup les mesures par télédétection (cf. Chap. 2) dans le visible et de manière plus atténuée dans le proche infrarouge. Un premier travail a donc été de corriger les données RAMI des effets atmosphériques.

II.3.1. Problème d'étalonnage des données RAMI

Les images aéroportées RAMI, fournies en compte numérique (CN), ont été converties en réflectance apparente à 3000 m d'altitude (R_{3000}) à l'aide des coefficients d'étalonnage $C_{étalon}$ (Tableau 3-3) et de l'éclairement solaire (Fig. 3-3 et Tableau 3-2) au dessus de l'atmosphère:

$$R_{3000} = \frac{\pi . CN}{C_{étalon} . E_s . \mu_s . 1000} .$$

La réflectance réelle R a été calculée avec le module de correction atmosphérique du logiciel 6S (Tableau 3-4).

	C1: 495-575nm		C2: 615-665nm		C3: 775-865nm	
	R_{3000}	R	R_{3000}	R	R_{3000}	R
P770	4.73	2.4	4.82	3.6	22.02	25.2
P650	5.18	3.0	5.41	4.3	22.78	26.1
P740	5.35	3.2	5.52	4.5	26.12	30.0
P1261	5.19	3.0	5.27	4.2	23.30	26.7
P641	5.11	2.9	5.19	4.1	24.13	27.7
P191	5.41	3.3	5.52	4.3	23.38	26.8
P171	5.86	3.8	5.98	5.0	24.54	28.2

Tableau 3-4: Réflectances apparentes R_{3000} et corrigés R (%) de sept parcelles. L'axe de vol considéré est le N°3.

L'analyse des réflectances apparentes (R_{3000}) et corrigées (R) des parcelles de pins (Tableau 3-4) fait apparaître une anomalie: les réflectances dans le rouge sont supérieures aux réflectances dans le vert. Les coefficients d'étalonnage étant probablement la cause de cette anomalie, nous avons essayé de calculer de nouveaux coefficients d'étalonnage à partir de mesures de réflectance (Fig. 3-4) effectuées sur le terrain lors de l'acquisition des données RAMI. Cette approche s'est avérée impossible car ces mesures n'ont pu être réalisées au

dessus des parcelles forestières mais uniquement sur de petites surfaces non boisées (route, chemins, bande d'herbe, etc.) qui correspondent à des pixels RAMI mixtes.

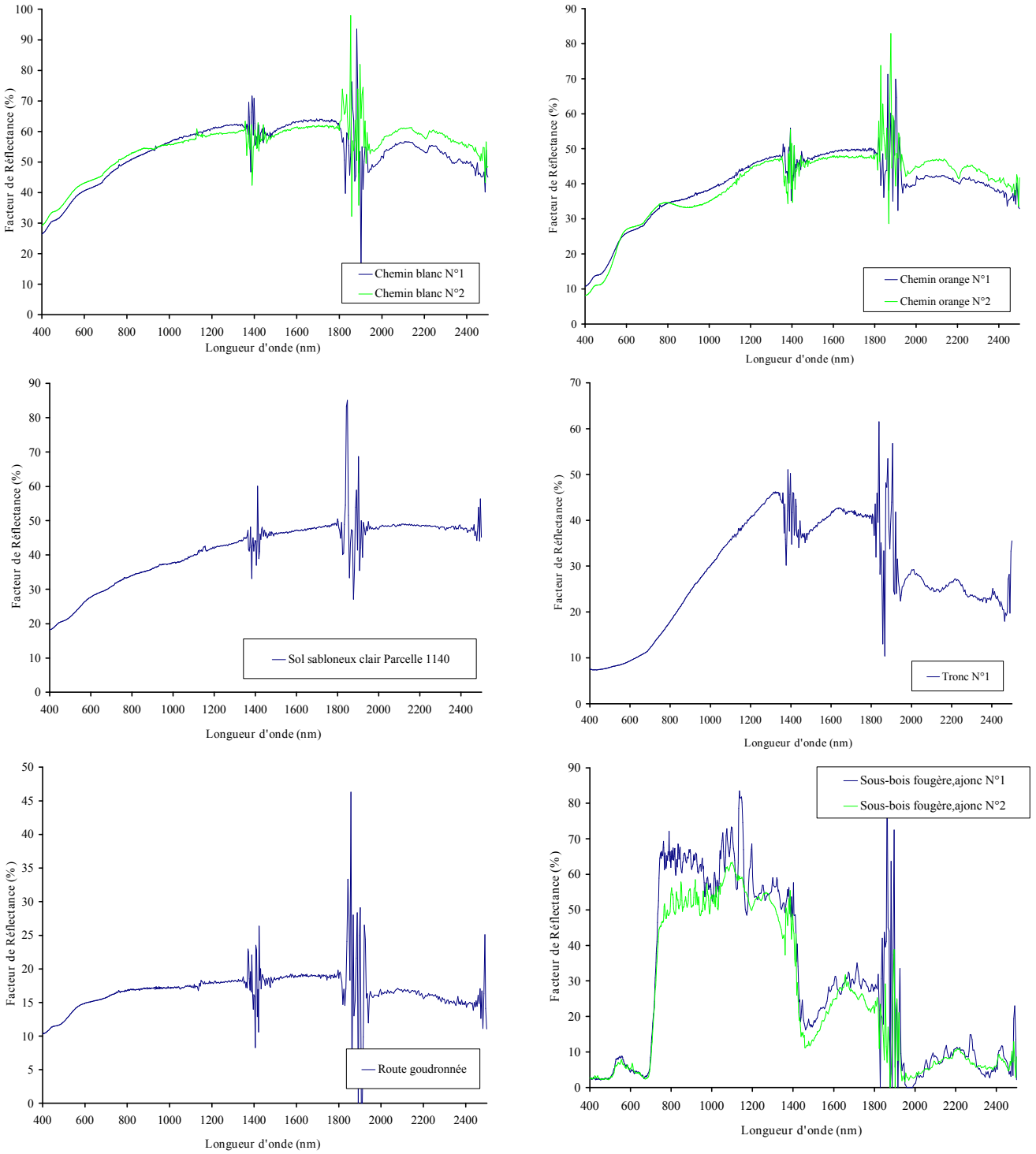


Figure 3-4: Réflectances bidirectionnelles spectrales de chemins, routes, sol sablonneux, tronc de pins, et sous-bois mesurées avec un spectromètre de terrain GER opérant de 400 à 2500 nm (GER, Note technique).

Une autre approche a donc été adoptée: les mesures RAMI sont étalonnées en tant que réflectance au sol (R) à partir de simulations DART de parcelles de pins dont les paramètres structuraux et les propriétés optiques foliaires sont connus. Cette approche est imprécise mais peut s'avérer la seule utilisable si par exemple les coefficients d'étalonnage ne sont pas disponibles ou imprécis et si les conditions atmosphériques sont inconnues. Sa fiabilité est

d'autant plus importante que la dynamique et le nombre de réflectances simulées sont élevés. Cette méthode est brièvement présentée ci-dessous.

II.3.2. Simulations DART de parcelles forestières du site d'étude et analyses

L'axe de vol N°3 comprend le plus de parcelles de pins pour lesquelles les caractéristiques biophysiques (LAI, etc.) ont été mesurées. De plus, la couverture nuageuse est faible. Nous avons donc choisi de simuler plus particulièrement les parcelles associées à cet axe de vol. Le nombre de parcelles est toutefois très peu élevé puisqu'il est de 10 seulement.

II.3.2.1. Configuration angulaire solaire pour les simulations DART

L'axe de vol N°3 fait environ un angle de 9° (Fig. 3-5) avec le Nord géographique. Il est perpendiculaire aux rangées d'arbres des parcelles, ce qui explique que dans le modèle DART, les angles azimutaux sont repérés par rapport à l'axe de vol. L'angle azimutal solaire $\phi_{sun\ DART}$ diffère donc du vrai azimut solaire ϕ_{sun}:

$$\phi_{sun\ DART} = 360° - (\phi_{sun} - 9°)$$

Ainsi, pour $\phi_{sun} = 147.21°$, on trouve $\phi_{sun\ DART} = 221.79°$, c'est à dire $\approx 222°$. Dans la suite de l'étude, les angles azimutaux mentionnés correspondent aux angles dans le repère DART.

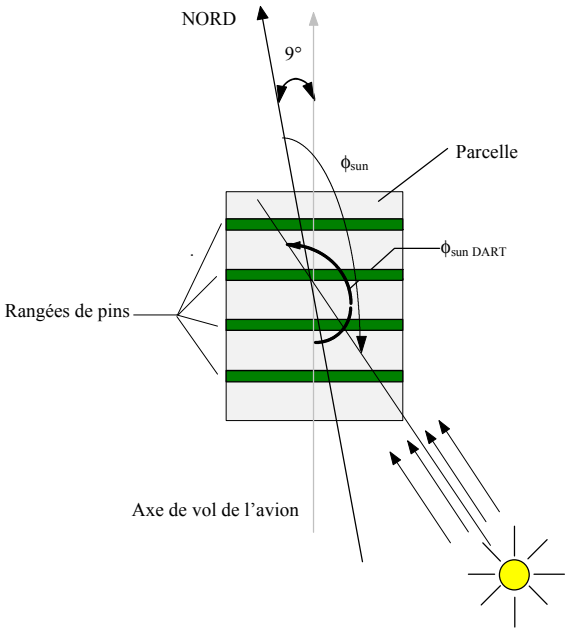


Figure 3-5: Angle azimutal solaire $_{sun\ DART}$ dans le repère du modèle DART.

II.3.2.2. Simulations DART et analyses

En fait, 3 parcelles ont été éliminées en raison de caractéristiques trop imprécises (milieu ouvert et réflectance du sous-bois inconnue, etc.). Les 7 parcelles retenues comprennent des arbres d'âge allant de 12 et 41 ans. La dynamique des grandeurs géométriques telles que la hauteur, la dimension des couronnes, etc. est donc importante (Tableau 3-1). Les simulations ont été conduites dans le vert, rouge et proche infrarouge avec une résolution spatiale de 25 cm et 92 directions discrètes pour la propagation du rayonnement. Conformément aux mesures de Rock et al. (1994), la réflectance et la transmittance des aiguilles de pins ont été prises égales à 10%, 5% et 40% respectivement dans le vert, rouge et proche infrarouge. Le sol a été assimilé à un plan lambertien de réflectance hémisphérique ρ_{sol} égale à 15%, 20% et 25% respectivement dans les 3 domaines

spectraux cités précédemment. Le sous-bois a été modélisé par une couche homogène d'herbe de hauteur H_{herbe} égale à 0.5 m et de LAI égal à 2. Les réflectances et transmittances foliaires du sous-bois ont été fixées à 15%, 5% et 45% dans le vert, rouge et proche infrarouge. La parcelle P191 (Fig. 3-6d) a déjà fait l'objet d'une étude dans le chapitre 2.

Les simulations (Fig. 3-6) ont été conduites avec un SKYL égal à 25, 20 et 15% respectivement dans le vert, rouge et proche infrarouge. Elles illustrent bien l'évolution des parcelles en fonction du vieillissement des arbres:

- accroissement des couronnes,
- désorganisation plus importante des rangées et diminution de la densité des arbres du fait des dépressages successifs,
- éloignement croissant des ombres des couronnes portées au sol du fait de l'augmentation de la hauteur des troncs et des couronnes. Pour une même configuration angulaire d'illumination et d'observation, les ombres des troncs se distinguent mieux. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les pins (40 ans) de la parcelle P191. Les couronnes des arbres de cette parcelle sont moins « opaques » que celles des autres parcelles car la densité foliaire est plus faible (Tableau 3-5).

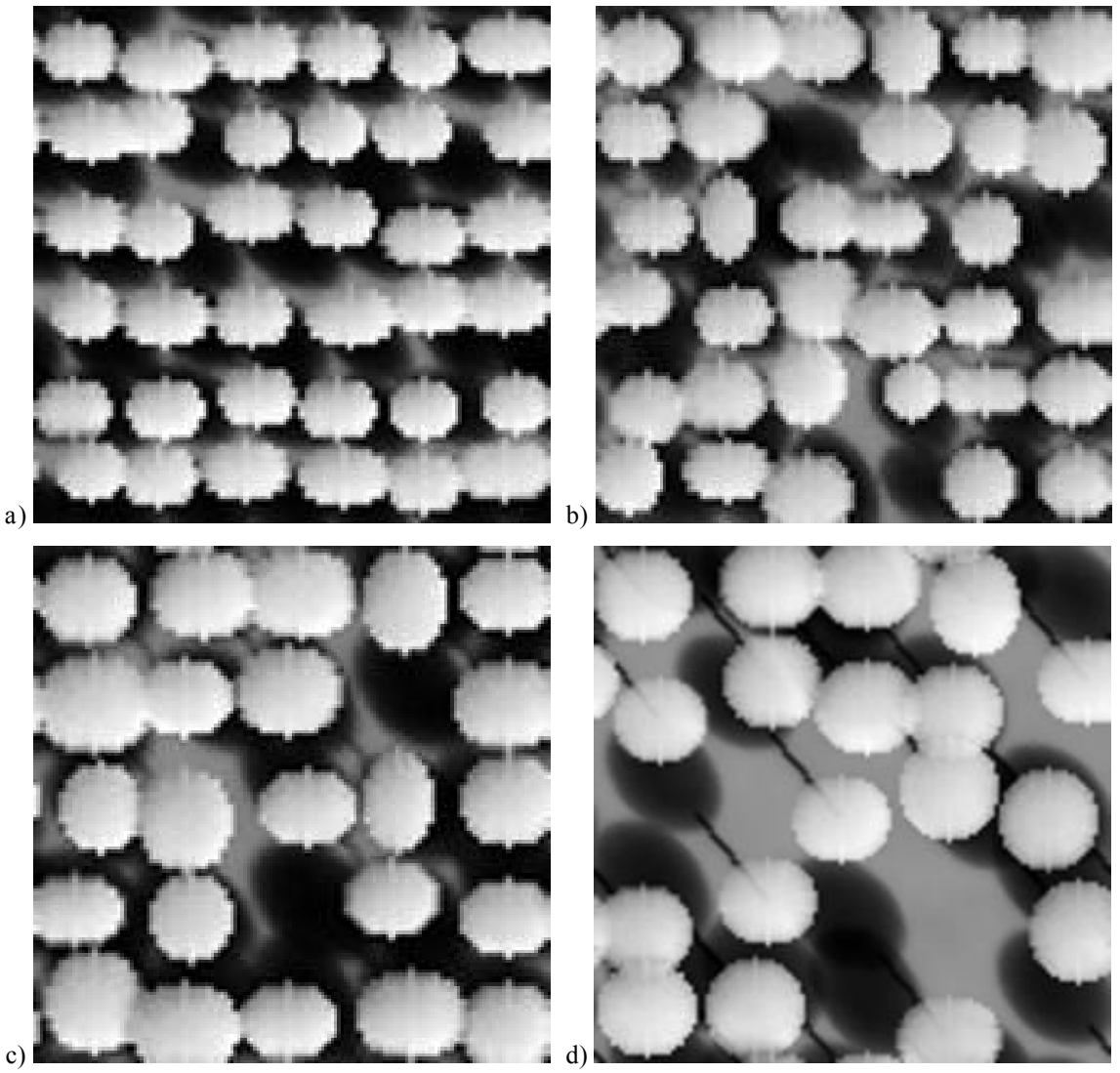


Figure 3-6: Simulations DART au nadir dans le domaine spectral du proche infrarouge de 4 parcelles de pins: (a) P770: 12 ans, (b) P650: 13 ans, (c) P1261: 20 ans et (d) P191: 40 ans.

Les réflectances moyennes DART des parcelles (Tableau 3-5) diffèrent des réflectances RAMI (Tableau 3-4) calculées avec les coefficients d'étalonnage dans les trois domaines spectraux considérés. Elles concordent avec les valeurs habituelles des couverts végétaux. Ainsi, la réflectance moyenne dans le vert est plus importante que celle dans le rouge.

	Age	LAI	%C	U_f (m^2/m^3)	Vert	Rouge	PIR
P770	12 ans	2.83	53.71	0.36	4.76	1.91	33.92
P650	13 ans	2.2	57.54	0.25	5.48	2.14	35.63
P740	19 ans	1.8	54.32	0.18	5.50	2.20	35.32
P1261	20 ans	3.45	60.12	0.30	5.10	1.89	35.66
P641	38 ans	2.385	62.82	0.14	5.22	1.96	36.54
P191	40 ans	1.59	49.46	0.11	5.70	2.39	34.82
P171	41 ans	2.01	49.46	0.15	5.64	2.37	36.60

Tableau 3-5: Réflectances moyennes DART (%) de parcelles dans le vert, rouge et proche infrarouge.

	P191	P650	P770	P1261
LAI	1.59	2.2	2.83	3.45
Sous-bois éclairé	V: 6.37 R: 3.66 PIR: 36.14	V: 6.16 R: 3.58 PIR: 35.73	V: 5.76 R: 3.56 PIR: 34.52	V: 5.98 R: 3.54 PIR: 34.73
Sous-bois à l'ombre d'un ou de plusieurs arbres	V: 2.00 R: 0.96 PIR: 16.44	V: 1.61 R: 0.76 PIR: 16.28	V: 1.16 R: 0.50 PIR: 13.95	V: 0.99 R: 0.43 PIR: 13.43
Couronne	V: 7.96 R: 3.26 PIR: 47.14	V: 7.83 R: 2.67 PIR: 48.26	V: 7.28 R: 2.59 PIR: 48.24	V: 7.89 R: 2.64 PIR: 50.34

Tableau 3-6: Réflectances moyennes (%) au nadir de 4 parcelles (vert (V), rouge (R), proche infrarouge (PIR)).

Les réflectances simulées (Fig. 3-7) dans le visible ont tendance à diminuer avec l'augmentation de l'indice foliaire. Cet effet correspond à une diminution de la réflectance du sous-bois éclairé et à l'ombre alors que la réflectance apparente des couronnes évolue peu (Tableau 3-6). Pour de faibles indices foliaires, la réflectance apparente des couronnes (R_{houp}) est due d'une part au rayonnement diffusé par les éléments foliaires du houppier et d'autre part, au rayonnement diffusé par les éléments foliaires du sous-bois qui est transmis à travers les couronnes. L'augmentation du LAI diminue la contribution du sous-bois et augmente la diffusion par les éléments foliaires de la couronne. La réflectance des couronnes tend donc à diminuer avec l'augmentation du LAI (LAI < 3), puis à augmenter au-delà. La diminution de la réflectance du sous-bois à l'ombre avec l'augmentation du LAI résulte de l'accroissement de l'opacité des couronnes avec le LAI. La réflectance du sous-bois éclairé tend à la fois à augmenter car l'augmentation du LAI implique une plus grande diffusion foliaire et à diminuer car le rayonnement atmosphérique est d'autant plus intercepté que les arbres sont hauts, c'est à dire âgés. La combinaison de ces effets explique que la réflectance des parcelles dans le vert tend à diminuer avec l'augmentation du LAI pour des LAI inférieurs à 3, puis à augmenter pour des LAI supérieurs à 3.

Le plus faible albédo foliaire dans le rouge explique que la réflectance dans le rouge diminue quand le LAI augmente, jusqu'à des LAI égaux à 3.5. Aucune tendance de la réflectance dans le proche infrarouge ne se dégage (Fig. 3-7c). Par contre, on retrouve la tendance classique du NDVI[1] en fonction de l'indice foliaire. Le NDVI augmente pour des faibles LAI et sature avec des LAI supérieurs à 3.

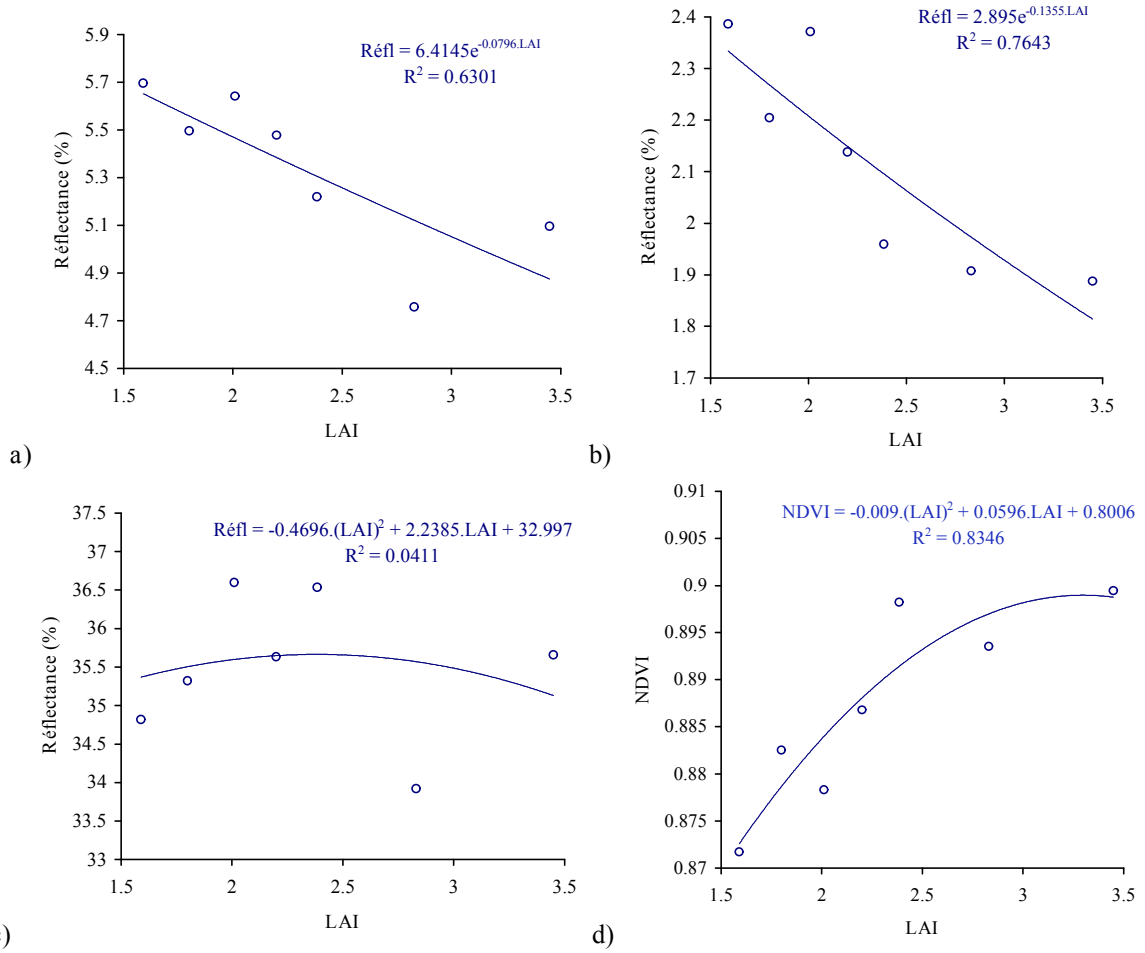


Figure 3-7: Réflectances moyennes DART (%) dans le vert (a), rouge (b) et proche infrarouge (c) et NDVI (d) de parcelles de pins en fonction de l'indice foliaire.

II.3.3. Étalonnage des données RAMI

Les réflectances moyennes des parcelles de pins simulées avec le modèle DART permettent d'obtenir par régression (Fig. 3-8) avec les moyennes des comptes numériques RAMI, les coefficients d'étalonnage des données aéroportées pour les différentes bandes spectrales. Compte tenu de l'éclairement solaire et atmosphérique moyen, les comptes numériques RAMI (CN) sont donc transformés en réflectance (R) à l'aide des équations:

- Canal 1: $R = 0.0686.CN + 1.0038$
- Canal 2: $R = 0.0437.CN - 0.517$
- Canal 3: $R = 0.2327.CN + 12.266$

Ces équations sont théoriquement applicables à la totalité des images spectrales correspondant à l'axe de vol N°3. Compte tenu de l'intervalle de temps très court entre les

[1] L'indice NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) est donné par le rapport $\frac{R_{PIR} - R_{Rouge}}{R_{PIR} + R_{Rouge}}$, où R_{PIR} et R_{Rouge} sont les réflectances dans le proche infrarouge et le rouge.

différentes acquisitions (axes de vol), nous avons supposé que ces équations sont également applicables à l'ensemble des images RAMI.

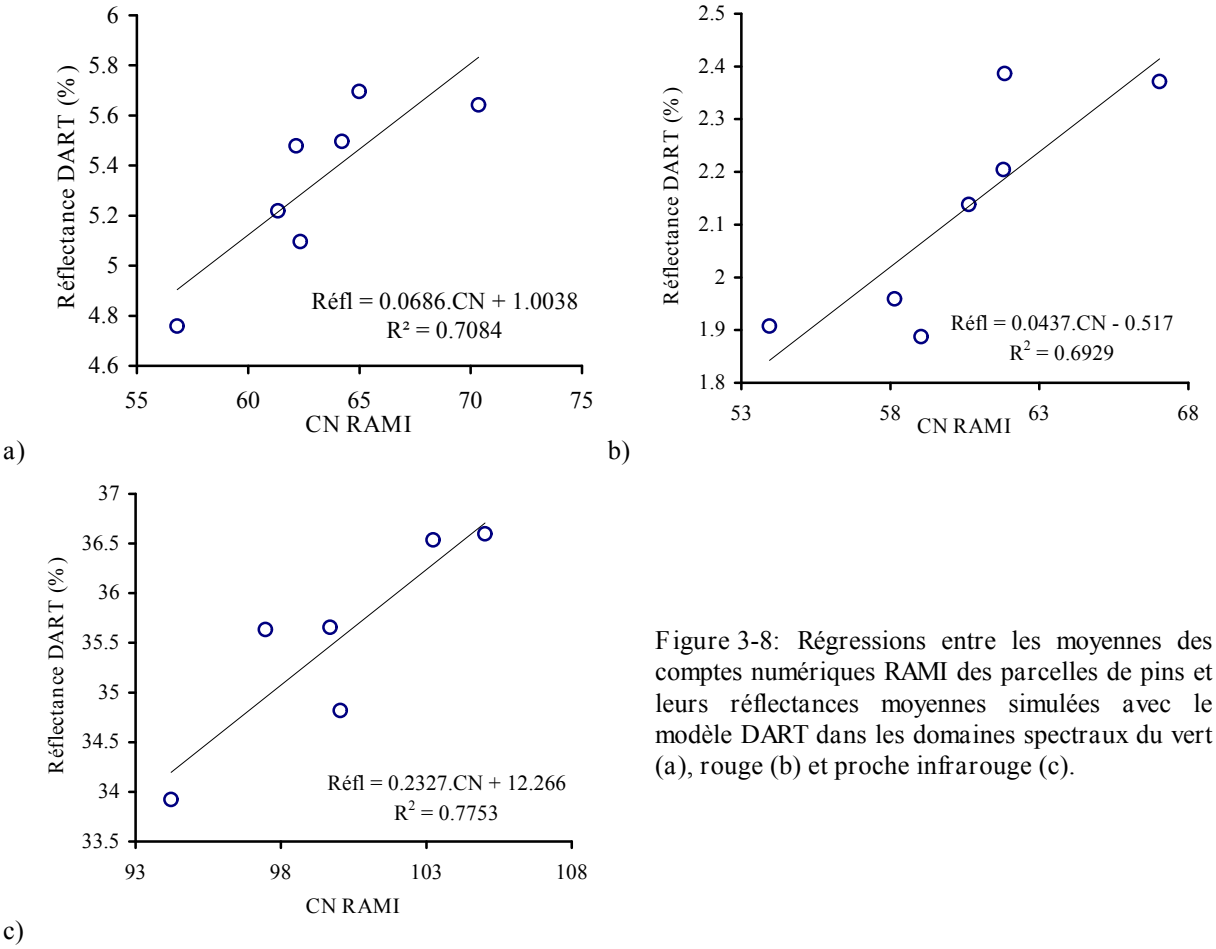


Figure 3-8: Régressions entre les moyennes des comptes numériques RAMI des parcelles de pins et leurs réflectances moyennes simulées avec le modèle DART dans les domaines spectraux du vert (a), rouge (b) et proche infrarouge (c).

III. DEFINITION ET QUANTIFICATION DE LA TEXTURE

III.1. Définition de la texture

L'information texturale combine l'information associée à la distribution des objets dans l'espace et l'information radiométrique associée aux comptes numériques caractéristiques des objets. Selon Lake (1991), elle est déterminée « par la forme et la configuration d'un groupe de pixels de niveaux de gris différents ». Elle n'est pas directement liée aux valeurs radiométriques des pixels mais aux relations spatiales qu'elles ont avec leurs voisins. L'étalonnage précis des images analysées n'est donc pas primordial. Cette remarque explique pourquoi l'étude de la texture des images RAMI a été possible. La signature texturale correspond à l'agencement ou distribution spatiale d'un motif de base dans l'image. Ce motif « unité » représente par exemple un arrangement répétitif d'éléments ou une périodicité dans l'image. La signature texturale est en principe indépendante de la taille et de la forme de l'image d'origine mais par contre, dépend de la taille et de la forme de la fenêtre d'analyse (Lejeune et al., 1987). Ainsi des opérateurs statistiques tels que la moyenne et la variance, souvent utilisés pour quantifier les caractéristiques texturales des images de télédétection dépendent directement de l'interaction entre la taille des objets au sol et la résolution du capteur. La signature texturale dépend donc de l'échelle d'analyse.

Il existe principalement deux types de méthodes d'analyse de la texture des images: les approches statistiques et les approches structurales. Les approches statistiques considèrent l'image comme un champ aléatoire ; la texture est assimilée au résultat de la variabilité spatiale des comptes numériques des pixels. Cette variabilité spatiale peut être quantifiée par l'étude de fréquences spatiales à partir, par exemple, de spectres de Fourier ou de matrices de cooccurrence (Haralick, 1979). Ces techniques d'analyse expriment et traduisent les contrastes locaux, l'homogénéité et la dépendance entre les comptes numériques sur un voisinage donné. D'autres outils statistiques plus simples tels que les histogrammes (Waksman et Rosenfeld, 1996), la variance, la moyenne, les moments statistiques, la fonction d'autocorrélation (Jupp et al., 1989), les variogrammes (Cohen et al., 1990) et différents indices comme le contraste ou l'entropie décrivent également le comportement textural d'une image. La création d'images texturales c'est-à-dire d'images d'indices texturaux s'avère être très utile en complément des images spectrales pour améliorer de manière significative des résultats de classifications (Gastellu-Etchegorry et Ducrot-Gambart, 1991).

En ce qui concerne les approches structurales, la texture peut être définie par des « primitives » vérifiant des « règles de placement ». Cette analyse convient à la reconnaissance d'objets de taille supérieure à l'échelle d'analyse. Les méthodes structurales s'appuient sur des critères morphologiques tels que la compacité, la connexité ou l'analyse fractale (Mandelbrot, 1975 ; Ramstein et Raffy, 1989).

III.2. Quantification de la texture à l'aide de variogrammes

III.2.1. Définition du variogramme

Dans cette étude, l'information texturale sera quantifiée au moyen de variogrammes. Cet outil statistique a été initialement utilisé en minéralogie (détection de minerai (Kridge, 1966)), puis son concept a été étendu dans d'autres domaines tels que l'hydrologie (Delhomme, 1976), la mécanique des sols (Vauclin, 1982) et les ressources forestières (Marbeau, 1976). Le variogramme $V(h(\theta))$ est un outil statistique provenant de la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965). Il décrit la variabilité entre tous les points d'une image, espacés dans une direction θ d'une distance h. Il mesure le degré de « dépendance spatiale » des pixels dans une direction spécifique. Il est défini par le demi-écart quadratique moyen des différences de tous les couples de pixels espacés de la distance h dans la direction θ:

$$V(h(\theta)) = \frac{1}{2}.E\left\{\left[f(r) - f(r + h(\theta))\right]^2\right\},$$

où r correspond à la position d'un pixel dans l'image, h est un vecteur de direction θ, f(r) une fonction qui représente le compte numérique ou radiométrique au point r et $E\{\}$ est l'opérateur espérance mathématique. L'utilisation d'un repère (Oxy) où l'axe Ox est parallèle à la direction $(\cos\theta, \sin\theta)$ permet de se ramener à une description unidimensionnelle: r est remplacé par x et $h(\theta)$ par h. Dans notre cas d'étude, f(x) est la réflectance du pixel x.

La forme du variogramme est une « signature » de la fonction f(x). Cet aspect est illustré par la figure 3-9. Trois structures spatiales sont considérées: f est une fonction dont les valeurs sont uniformément distribuées (Fig. 3-9a), f est une fonction spatialement périodique (Fig. 3-9b) et les valeurs de f sont indépendantes au-delà d'une distance a (Fig. 3-9c). Le caractère indépendant de f se traduit par une valeur quasiment constante du variogramme pour toute valeur du pas h. Par contre, le caractère périodique de f implique une périodicité du variogramme. Dans le dernier cas, on constate que le variogramme se stabilise à partir d'une distance « a » au delà de laquelle les valeurs de la fonction f tendent à être indépendantes.

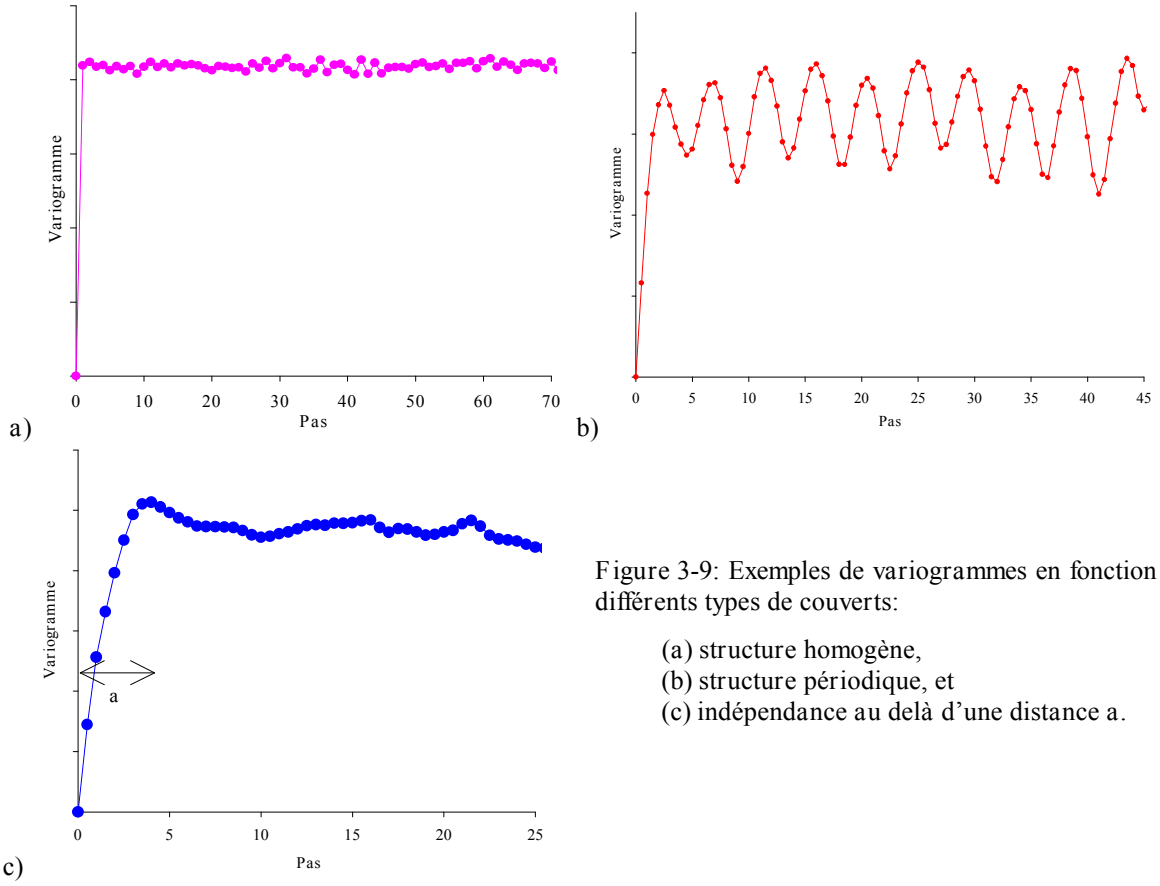


Figure 3-9: Exemples de variogrammes en fonction de différents types de couverts:

(a) structure homogène,
(b) structure périodique, et
(c) indépendance au delà d'une distance a.

Le palier est la valeur de stabilisation du variogramme ; dans le cas périodique, le variogramme oscille autour de cette valeur. La valeur du palier est estimée ci-dessous:

La covariance Cov(h) de 2 fonctions f_1 et f_2 est:

$$Cov(h) = E\{[f_1(x_1) - m_1] . [f_2(x_2) - m_2]\} \text{ avec } |x_1 - x_2| = h$$

où les termes $m_i = E\{f_i(x)\}$ sont les valeurs moyennes des fonctions f_i

Si les fonctions f_1 et f_2 sont identiques, la covariance est la fonction d'autocorrélation

$$R(h) = E\{[f(x_1) - m] . [f(x_2) - m]\} \text{ avec } |x_1 - x_2| = h .$$

Le variogramme V(h) peut être exprimé en fonction de R(h),

$$V(h) = \frac{1}{2} . E\{ [f(x) - f(x+h)]^2 \} = \frac{1}{2} . E\{ [((f(x)-m)+m) - ((f(x+h)-m)+m)]^2 \}$$

$$V(h) = \frac{1}{2} . E\{ [(f(x)-m) - (f(x+h)-m)]^2 \}$$

$$V(h) = \frac{1}{2} . E\{ [(f(x)-m)^2 + (f(x+h)-m)^2 - 2.(f(x)-m).(f(x+h)-m)] \}$$

$$2.V(h) = E\{ (f(x)-m)^2 \} + E\{ (f(x+h)-m)^2 \} - 2.E\{ (f(x)-m).(f(x+h)-m) \}$$

f étant stationnaire : $m = E\{ f(x) \} = E\{ f(x+h) \}$ et $R(0) = E\{ (f(x)-m)^2 \} = E\{ (f(x+h)-m)^2 \}$

ce qui implique: $\boxed{V(h) = [R(0) - R(h)]}$

La fonction d'autocorrélation R(0) est en fait égale à la variance Var de l'image. D'autre part, la fonction d'autocorrélation R(h) tend vers 0 si les valeurs de f(x) et f(x+h) deviennent indépendantes ou décorrélées quand h augmente. Le variogramme devient alors égal à la variance Var quand h devient très grand. Dans le cas périodique, cette limite n'existe pas car la fonction d'autocorrélation R(h) contient aussi une composante périodique de même période que f(x). Le variogramme oscille alors autour de la valeur limite R(0). Pour des images stationnaires, il apparaît donc que le variogramme V(h) est égal à la variance R(0) moins la fonction d'autocorrélationR(h).

III.2.2. Évaluation pratique des variogrammes

Nous calculons les variogrammes à partir de n(h) couples de pixels « image » de coordonnées x et de valeur radiométrique f(x), distants de h(θ) dans la direction θ:

$$V(h(\theta)) = \frac{1}{2.n(h)} \sum_{k=1}^{n(h)} \left[f(x_k) - f(x_k + h(\theta)) \right]^2 ,$$

Les variogrammes verticaux et horizontaux sont des variogrammes particuliers de directions $\theta = 0°$ et $\theta = 90°$. Les couples de pixels sont alors espacés d'un nombre entier h de pixels. Ils se trouvent sur une même ligne ou une même colonne de l'image. Le premier point du variogramme est la valeur calculée pour tous les couples de pixels confondus (h = 0), le deuxième pour tous les couples de pixels contigus (h = 1), le troisième pour tous les couples séparés par un pixel (h= 2), le quatrième pour un espacement de deux pixels (h= 3), etc.

Le calcul de variogrammes suivant une direction quelconque, différente de $\theta = 0°$ ou $\theta = 90°$, repose sur une approche un peu plus complexe. Un traitement préliminaire permet de mémoriser la plus longue chaîne de pixels dans l'image selon la direction θ considérée ainsi que les longueurs de traversée des différents pixels qui constituent cette chaîne. Ainsi, par simple translation du pixel de départ, il est facile de trouver tous les couples de pixels espacés d'une longueur l précalculée. Suivant une direction θ, les valeurs successives de h(θ) pour lesquelles le variogramme directionnel est calculé, ne sont pas forcément équidistantes comme dans le cas des variogrammes verticaux ou horizontaux (Fig. 3-10). Le nombre de points dépend de la direction du variogramme.

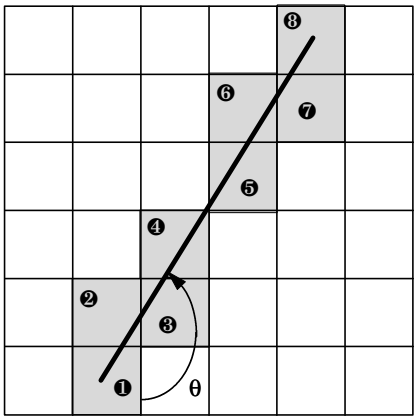


Figure 3-10: Exemple de calcul d'un variogramme directionnel. Les distances entre les pixels voisins « 1 2 », « 2 3 » et « 3 4 », etc. ne sont pas égales si est différent de k. —, où k est un nombre entier.
4

De plus, tous les variogrammes sont calculés pour des distances h allant de 1 pixel à h_{max} pixels. La valeur de h_{max} est limitée par la taille de l'image: elle ne doit pas excéder en général, un tiers du plus grand transect possible. En effet, au delà de cette valeur, l'estimation

du variogramme devient peu fiable compte tenu du nombre limité de couples de pixels possibles dans l'image (ILWIS, 1993).

III.2.3. Paramétrisation des variogrammes

Deux paramètres principaux (Curran, 1988) décrivent un variogramme (Fig. 3-11):

- palier p : valeur asymptotique horizontale égale à la variabilité radiométrique dans l'image selon la direction de calcul du variogramme.
- portée a : valeur de h pour laquelle le palier est atteint.

Le fait d'atteindre le palier p au-delà d'une distance a, indique que l'influence respective des points séparés d'une longueur supérieure à a est négligeable. L'absence de palier est le plus souvent liée à une image de trop petite dimension ; par exemple, si cette dimension n'excède pas le triple de la portée.

Nous pouvons estimer ces paramètres à l'aide de deux modèles communément utilisés:

- modèle sphérique: $\begin{cases} V(h(\theta)) = \frac{V_0}{2}.[3.V_1.h(\theta) - V_1^3.h^3(\theta)] \text{ si } h(\theta) \le \frac{1}{V_1} \\ V(h(\theta)) = V_0 \text{ si } h(\theta) > \frac{1}{V_1} \end{cases}$
- modèle exponentiel: $V(h(\theta)) = V_0.[1 - \exp(-V_1.h(\theta))]$,

où V_0 est une estimation asymptotique du palier p et $\frac{1}{V_1}$ est égal à la portée a dans le cas du modèle sphérique et est seulement un indicateur du paramètre a dans le cas exponentiel ce qui complique son interprétation physique. L'utilisation du modèle sphérique est pour cette raison beaucoup plus répandue. Nous avons cependant dans notre cas d'étude choisi arbitrairement le modèle exponentiel du fait de sa simplicité mathématique.

On trouve également d'autres modèles dans la littérature: modèle puissance, modèle linéaire, modèles composites, etc. (Woodcock et al., 1988 ; Ramstein et Raffy, 1989).

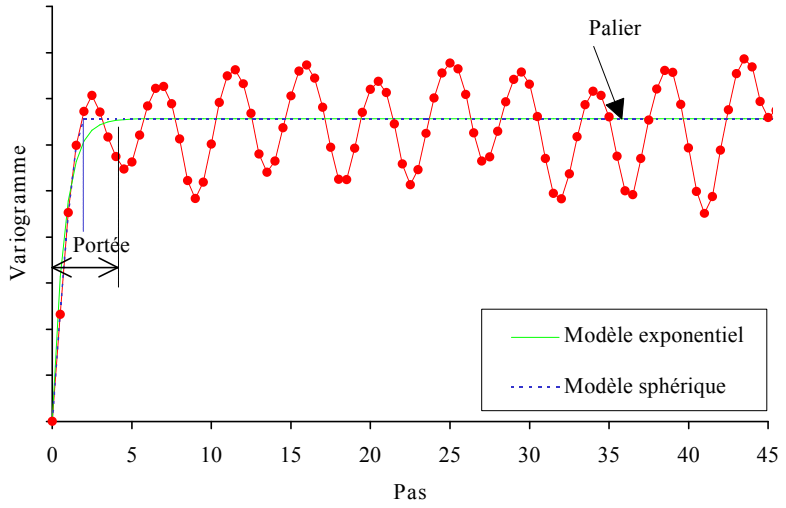


Figure 3-11:
Ajustement d'un variogramme de couvert périodique par un modèle exponentiel et un modèle sphérique.

III.2.4. Cas d'étude utilisant les variogrammes

Les variogrammes ont déjà été utilisés dans diverses études « empiriques » ou « basées sur l'utilisation de modèles » pour décrire l'information texturale d'images satellitaires ou aéroportées.

Ramstein et Raffy (1989) ont adopté une approche empirique. Ainsi, le calcul de variogrammes sur des images Landsat TM comprenant différentes unités de paysage (zone urbaine à forte ou faible densité de population, zone agricole, zone forestière) a permis de mettre en évidence le fait que la portée a est un bon indicateur du type de texture. Le palier p semble particulièrement sensible à la résolution spatiale.

Woodcock et al. (1988a,b) calculent de manière analytique les variogrammes d'images constituées de disques de même compte numérique aléatoirement distribués dans un milieu homogène de compte numérique constant. Cette approche permet d'étudier la sensibilité des variogrammes à des caractéristiques de la scène telles que le taux de couverture et la dimension des disques. Les auteurs ont montré un lien direct entre plusieurs paramètres structuraux de la scène et les paramètres p et a descriptifs de la texture. La hauteur des paliers des variogrammes est directement liée à la densité des objets dans la scène et par conséquent au taux de couverture des disques. Par ailleurs, pour un taux de couverture donné, la portée est corrélée à la taille des objets et l'augmentation de la variabilité des dimensions des objets modifie la forme du variogramme qui devient beaucoup plus arrondie près du palier. Ces résultats théoriques ont été comparés avec des variogrammes obtenus à partir d'images satellitaires et aéroportées. Des simulations de cultures ou de plantations ont également permis de montrer la sensibilité des variogrammes aux périodicités dans l'image. Ces auteurs ont aussi étudié la texture « bidimensionnelle » avec des variogrammes bidimensionnels. Ces derniers sont très sensibles aux anisotropies directionnelles dans les images et à la présence d'éléments contribuant à l'hétérogénéité spatiale (ex: habitation dans une vaste zone agricole homogène).

Saint-Onge et Cavayas (1995) ont utilisé une autre approche pour analyser l'influence de la taille des arbres et de leur densité sur la structure spatiale d'images haute résolution de parcelles forestières. Dans un premier temps, ils ont simulé des images de parcelles à l'aide d'un modèle 3-D de génération de canopée et d'un modèle de transfert radiatif du type géométrique/optique. Ces images leur ont permis d'analyser l'influence d'un paramètre à chaque fois sur l'information texturale des image et d'établir des relations prédictives pour le diamètre des couronnes, la hauteur des arbres et la densité. Ces relations prédictives ont été testées avec succès sur des images réelles aéroportées acquises à 0.36 m de résolution. Les auteurs ont ensuite testé l'influence de la résolution spatiale avec des données dégradées de 0.36 m à 2.16 m de résolution par moyennage à l'aide d'une fenêtre 6×6 pixels. De bons résultats ont été obtenues pour la hauteur des arbres et la densité.

III.2.5. Variogramme, fonction d'autocorrélation et transformée de Fourier

Le choix des variogrammes pour caractériser la texture est dû à: (1) son utilisation fréquente dans la communauté scientifique, ce qui permet une comparaison directe avec des résultats déjà obtenus, (2) sa facilité d'utilisation et sa rapidité de calcul et enfin (3) son aptitude à restituer directement des paramètres couramment utilisés (degré d'indépendance des valeurs: palier, période spatiale: période, distance d'indépendance des valeurs: portée).

D'autres fonctions telles que la fonction d'autocorrélation, la transformée de Fourier ou la dimension fractale (Ramstein et Raffy, 1989) auraient pu être retenues. Ces fonctions sont en effet très proches du variogramme et permettent le calcul de paramètres similaires.

- Fonction d'autocorrélation: D'après la relation établie au §.III.2.1., le palier p du variogramme est lié à la fonction d'autocorrélation. Cependant, l'utilisation du variogramme repose sur des hypothèses d'application beaucoup moins rigides que pour la fonction d'autocorrélation (Ramstein et Raffy, 1989 ; Jupp et al., 1988).
- Transformée de Fourier: Elle indique les fréquences spatiales caractéristiques de l'image (Fig. 3-12). Cependant, son utilisation nécessite une contrainte de stationnarité aussi stricte que celle de la fonction d'autocorrélation (Ramstein et Raffy, 1989).

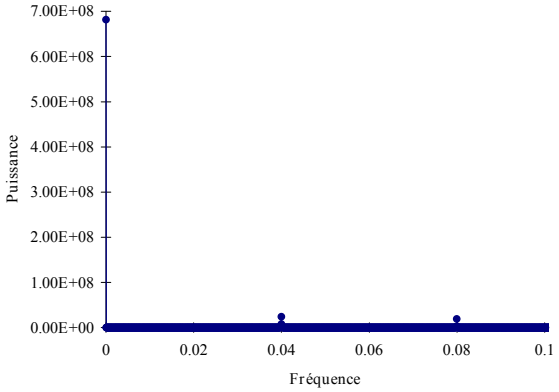


Figure 3-12:
Spectre en puissance de la transformée de Fourier d'une image périodique de bandes blanches et noires. La période est égale à 25 pixels. La transformée inverse de Fourier de ce spectre est la fonction d'autocorrélation.

Nous utiliserons principalement dans notre étude, des variogrammes horizontaux et verticaux, car les données Push-Broom ont été acquises avec un axe de visée perpendiculaire aux rangées d'arbres du site forestier de Nézer (cf. §.II.). Cependant, nous calculerons des variogrammes directionnels pour évaluer l'influence des configurations d'illumination et d'observation sur le comportement textural des images.

III. INFLUENCE THEORIQUE DE PARAMETRES STRUCTURAUX DES PLANTATIONS FORESTIERES SUR LA SIGNATURE TEXTURALE

La distribution spatiale des objets présents dans une image est le facteur déterminant de la texture. Une étude théorique a tout d'abord été réalisée pour évaluer l'influence de paramètres simples caractéristiques de la structure des images simulées de couverts forestiers. Des plantations régulières composées de rangées d'arbres, de sous-bois et de sol sont considérées. La distribution spatiale des comptes numériques des pixels selon une direction (Ox) normale aux rangées d'arbres peut être représentée par une fonction « créneau » (Fig. 3-13):

$$f(x)=\begin{cases} a \text{ si } x \in [nT \;\; nT+T_1] \\ b \text{ si } x \in [nT+T_1 \;\; (n+1).T] \end{cases} \text{ avec } n \in [0 \;\; N-1].$$

f(x) est la valeur radiométrique au point x, N est le nombre de rangées, T est la période (distance entre les rangées), T_1 est la largeur des rangées d'arbres, a est la valeur radiométrique des rangées d'arbres et b est la valeur radiométrique entre les rangées d'arbres.

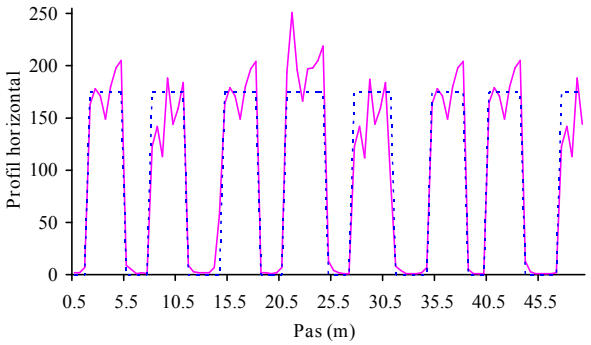


Figure 3-13: Profil radiométrique normal aux rangées d'arbres d'une plantation forestière simulée (trait plein). La courbe en trait pointillé représente le profil schématique [0 175].

Le calcul du variogramme de cette fonction est indiqué ci-dessous dans le cas où la largeur des rangées T_1 est inférieure ou égale à la demi-période spatiale $\frac{T}{2}$. Compte tenu de la répétitivité selon l'axe (Ox), seul l'intervalle [0 T[est décrit par x_i. Les expressions mathématiques diffèrent suivant que h appartient à l'intervalle [nT nT+T_1] ou [nT+T_1 (n+1).T]:

❶ $h \in [nT \;\; nT+T_1]$ et $T_1 \leq \frac{T}{2}$

➤ $\underline{x_i < T_1}$

✻ $\underline{nT < (x_i+h) < nT+T_1}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = 0$

✻ $\underline{nT+T_1 < (x_i+h) < (n+1)T}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = \frac{kh}{T}(b-a)^2$

➤ $\underline{T_1 < x_i < T}$

✻ $\underline{nT+T_1 < (x_i+h) < (n+1)T}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = 0$

✻ $\underline{(n+1)T < (x_i+h) < (n+1)T+T_1}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = \frac{kh}{T}(b-a)^2$

❷ $h \in [nT+T_1 \;\; (n+1)T]$ et $T_1 \leq \frac{T}{2}$

➤ $\underline{x_i < T_1}$

➔ $h \in [nT+T_1 \;\; (n+1)T\text{-}T_1]$

✻ $\underline{nT+T_1 < (x_i+h) < (n+1)T}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = \frac{kT_1}{T}(b-a)^2$

➔ $h \in [(n+1)T\text{-}T_1 \;\; (n+1)T]$

✻ $\underline{(n+1)T\text{-}T_1 < (x_i+h) < (n+1)T}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = \frac{k(T-h)}{T}(b-a)^2$

✻ $\underline{(n+1)T < (x_i+h) < (n+1)T+T_1}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = 0$

➤ $\underline{T_1 < x_i < T}$

✻ $\underline{nT+2T_1 < (x_i+h) < (n+1)T}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = 0$

✻ $\underline{(n+1)T < (x_i+h) < (n+1)T+T_1}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = \frac{kT_1}{T}(b-a)^2$

✻ $\underline{(n+1)T+T_1 < (x_i+h) < (n+2)T}$: $\sum[f(x_i+h)-f(x_i)]^2 = 0$

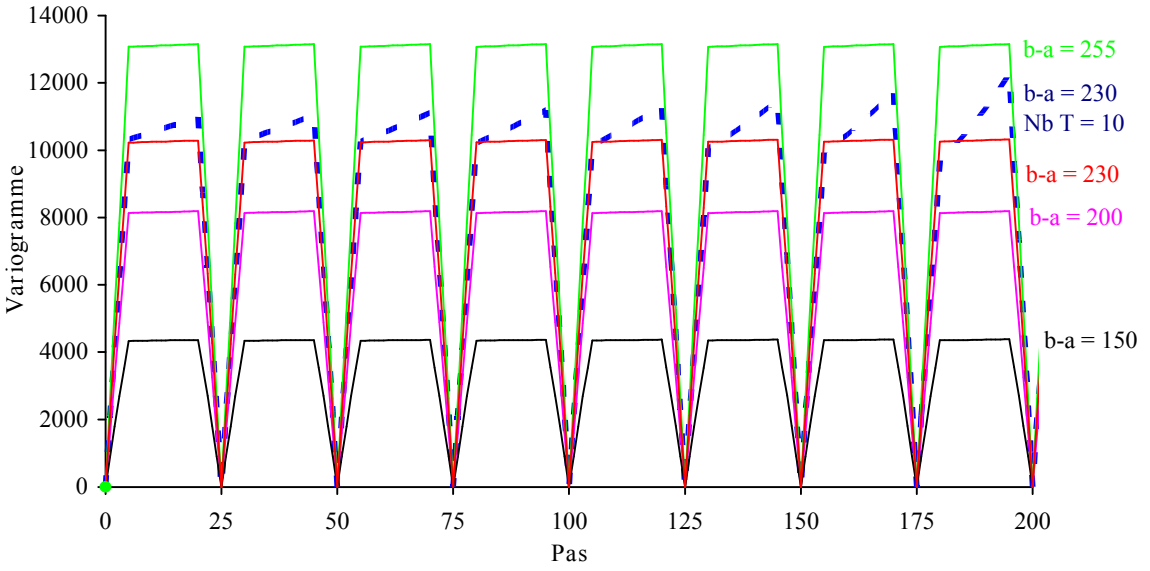
En résumé, on obtient :

$$V(h) = \begin{cases} \frac{h}{T}(b-a)^2 & \text{si } h \in [nT \;\; nT+T_1[\\ \frac{T_1}{T}(b-a)^2 & \text{si } h \in [nT+T_1 \;\; (n+1)T-T_1[\\ \frac{(T+T_1-h)}{2.T}(b-a)^2 & \text{si } h \in [(n+1)T-T_1 \;\; (n+1)T] \end{cases}$$

Cette expression du variogramme a été vérifiée sur des images périodiques schématiques (2500 lignes x 2500 colonnes) à 2 niveaux a et b (Fig. 3-14). L'influence de différents paramètres a été testée: amplitude (b-a) des créneaux (Fig. 3-14a), largeur T_1 des rangées d'arbres (Fig. 3-14b) et variabilité des valeurs de a et b dans un intervalle de valeur $2.\Delta$ (Fig. 3-14c):

- amplitude (b-a) des créneaux: La figure 3-14a indique que les paliers sont d'autant plus forts que l'écart (b-a) est grand. Le variogramme s'annule pour les pas multiples de la période. Dans le cas de petites images, c'est à dire en présence d'un petit nombre de périodes, l'estimation du variogramme devient imprécise: le palier est en particulier plus mal évalué. Ceci est illustré avec le variogramme (trait pointillé) d'une image (250x 250).
- largeur T_1 des rangées d'arbres: En maintenant l'amplitude (b-a) constante, l'augmentation du rapport T_1/T fait croître le palier tout en diminuant sa largeur (Fig. 3-14b). Le palier disparaît pour $T=2.T_1$. La variance de l'image est alors maximale car les nombres de pixels de valeurs a et b sont égaux.
- Variabilité de a et b: Ces variables sont supposée être uniformes avec $a \in [a - \Delta]$ et $b \in [b - \Delta]$. Tout variogramme V_Δ correspond au variogramme $V_{\Delta=0}$ à une translation près (Fig. 3-14c). La valeur de cette translation est positivement corrélée à Δ. Le variogramme ne s'annule plus pour les pas h multiples de la période T.

Cette étude préliminaire très schématique a été effectuée dans le but de mieux comprendre l'influence de différents paramètres du couvert sur l'information texturale d'images de télédétection et de simulation. Cet aspect est important pour la détermination de paramètres du couvert par inversion de données de télédétection.



a)

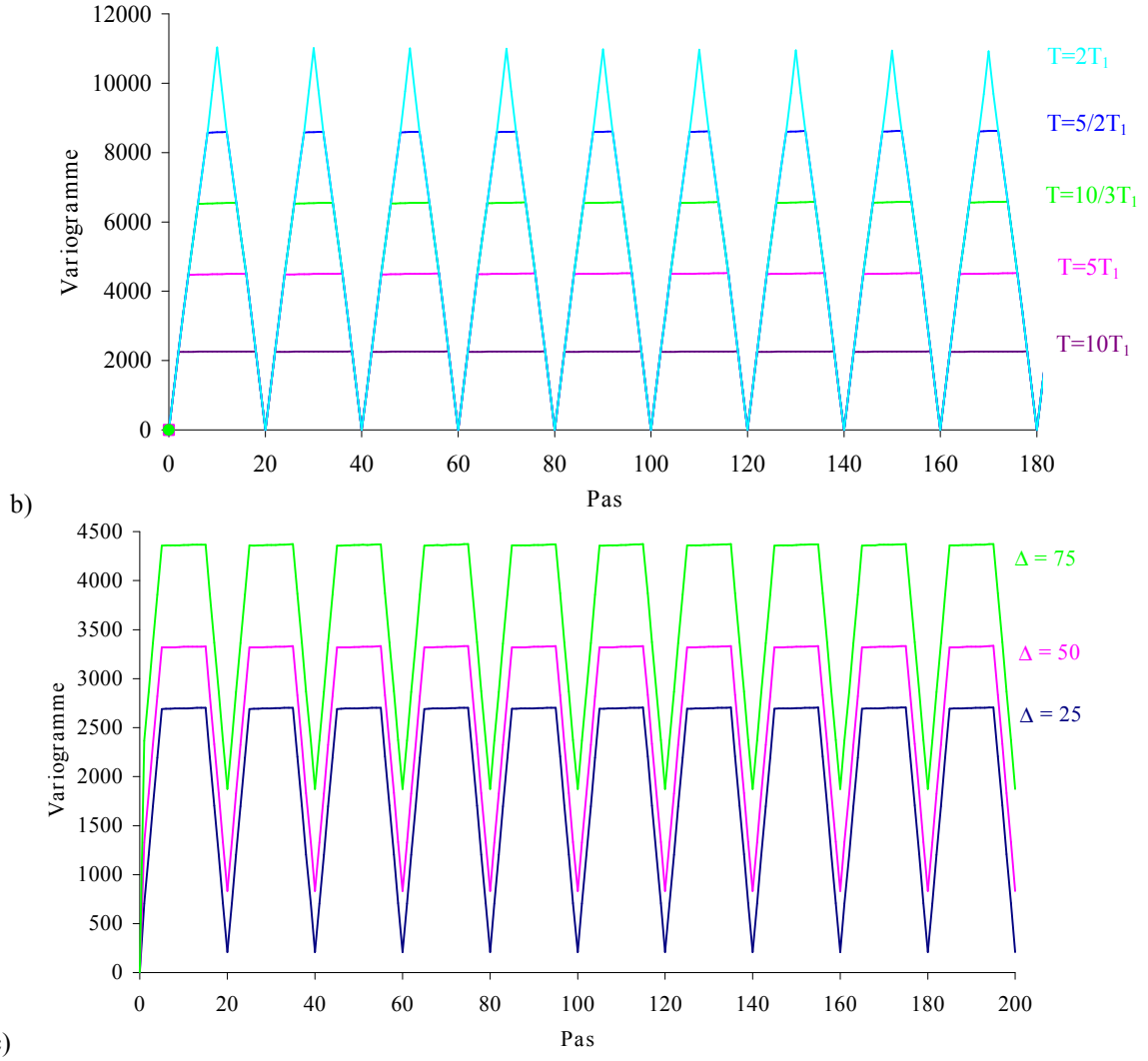


Figure 3-14: Variabilité des variogrammes selon divers paramètres structuraux d'une plantation forestière périodique schématique infinie : (a) Différence d'amplitude (b-a) des créneaux: T = 25 pixels, T_1 = 5 pixels et (b-a) varie de 150 à 255. La courbe en traits pointillés représente le variogramme d'une image 250 x 250 (N = 10). (b) Largeur T_1 du créneau: (b-a) = 250 et T = 20 pixels. (c) Variabilité de l'amplitude: $b \in [b\text{-}D \;\; b+D]$ et $a \in [a\text{-}D \;\; a+D]$, avec a = 80 et b = 180. T = 20 pixels et T_1 = 5 pixels.

IV. INFLUENCE DES PARAMETRES BIOPHYSIQUES - APPROCHE DART

Ce paragraphe reprend l'étude précédente avec des simulations DART de plantations régulières de pins, représentatives du site de Nézer. Les résultats sont comparés avec des données aéroportées RAMI. Conformément aux résultats du chapitre 2 (résolution optimale pour modéliser les scènes), nous avons utilisé des cellules élémentaires de 50 cm. Toutes les scènes simulées comprennent un sol plan de réflectance hémisphérique 15% (visible) et 20% (proche infrarouge) et un sous-bois homogène de hauteur 50 cm. Les réflectance et transmittance hémisphériques du sous-bois sont 15% (vert) et 45% (proche infrarouge). Le LAI du sous-bois est 3. La canopée se compose de pins de hauteur moyenne de 14.5 m. Les houppiers sont de forme ellipsoïdale et de diamètre moyen 3.5 m. Le LAI de la canopée est 2.92. Les réflectances ρ_f et transmittances τ_f hémisphériques des aiguilles ont été fixées à 10% (vert) et à 40% (proche infrarouge) conformément aux mesures de Rock et al. (1994). En fait, les mesures expérimentales réalisées au CESBIO (Fig. 3-15) ont mis en évidence une différence notable entre ρ_f et τ_f. Des valeurs identiques pour ρ_f et τ_f ont été conservées dans le but d'extrapoler les résultats obtenus au cas des couverts caduques pour lesquels ρ_f et τ_f sont souvent supposées similaires.

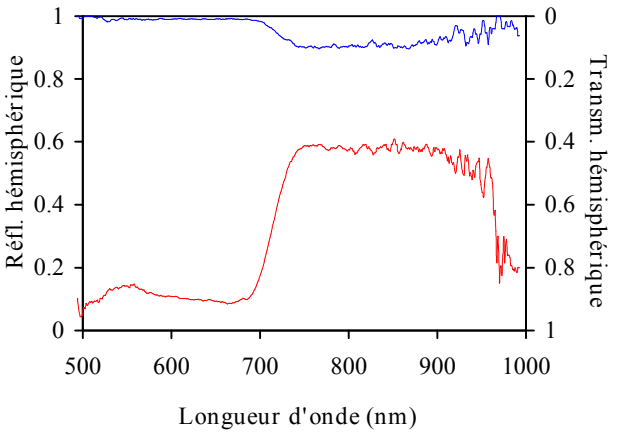


Figure 3-15: Réflectance et transmittance hémisphériques d'aiguilles de pins maritimes mesurées en laboratoire avec le spectromètre EOTECH (Manuel d'instruction).

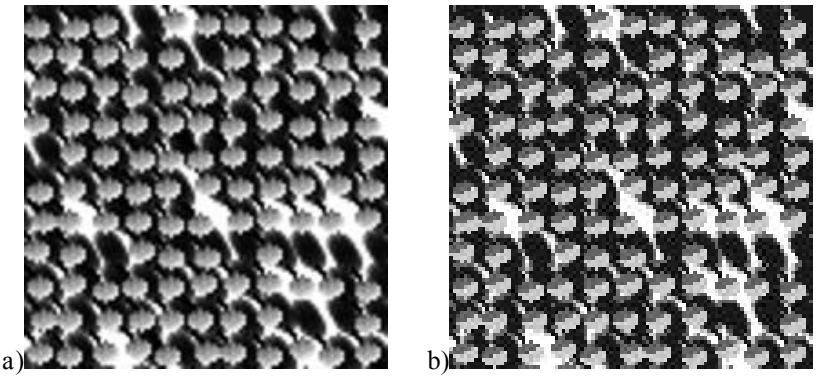
Les arbres ont été disposés aléatoirement dans un rayon de 50 cm autour des nœuds d'une grille de résolution de 4.5 m de manière à restituer la variabilité naturelle de leurs positions. L'hétérogénéité spatiale de la distribution des arbres est simulée avec un taux de 10% de non occupation des noeuds. La maquette ainsi simulée correspond à une parcelle représentative de pins de 25 ans du site de Nézer. Elle mesure 50 m par 50 m et comprend 47.630 cellules « feuille », 1.210 cellules « tronc », 10.000 cellules « sol » et 10.000 cellules « herbe ». La direction d'éclairement solaire de la scène correspond à un angle zénithal de 148.8° et un angle azimutal de 222°. Sauf mention contraire, seules les images simulées pour une observation au nadir ont été utilisées. A partir de cette configuration dite « configuration de base », nous avons fait varier individuellement les paramètres structuraux et d'éclairement (SKYL), pour quantifier leur influence sur la texture des images.

IV.1. Influence de la précision du modèle de transfert radiatif

Des études antérieures (Saint-Onge et Cavayas, 1995 ; Woodcock et al., 1988a,b) ont été conduites pour estimer l'influence de certains paramètres biophysiques (hauteur des arbres, biomasse de parcelles forestières, dimensions des couronnes) sur la texture d'images de télédétection générées avec des modèles plus ou moins précis. Des relations prédictives ont été dégagées de ces travaux. Ainsi, Woodcock et al. (1988a) insistent sur le fait qu'un simple modèle de distribution de disques peut expliquer l'information texturale des images de télédétection de couverts forestiers. Leur approche repose cependant sur une hypothèse simplificatrice majeure: ils supposent a priori connues les caractéristiques optiques et géométriques des disques. En fait, ces caractéristiques dépendent des caractéristiques réelles des objets dans la scène, et donc des configurations angulaires d'illumination et d'observation, de la biomasse foliaire des couronnes, etc. Cette approche s'avère donc difficile à mettre en oeuvre. Dans la plupart des cas, elle nécessite l'utilisation de modèles susceptibles de calculer la réflectance des objets de la scène.

Les modèles de génération d'images nécessaires doivent cependant être plus ou moins précis en fonction de la situation considérée. Par exemple, l'analyse de scènes comprenant des canopées très ouvertes ou de faibles indices foliaires nécessite des simulations plus précises que dans le cas de couverts denses et fermés de manière à prendre en compte la transmission du rayonnement à travers les couronnes car la couche de sous-bois peut fortement influencer les mesures de réflectance et par conséquent la texture des images. De manière similaire, l'influence de l'atmosphère doit être prise en compte car elle atténue le contraste des images en particulier dans le domaine visible. Il convient donc de considérer les diffusions multiples entre les éléments foliaires ; les couronnes des arbres ne doivent pas être assimilées à des objets parfaitement opaques comme pour les modèles géométriques simples (Li et

Strahler, 1985). De même, Saint-Onge et Cavayas (1995) ont simulé des images de couverts avec un modèle qui néglige les diffusions multiples. Dans ce cas, l'image d'un couvert forestier où les arbres sont coniques comprend uniquement 4 niveaux de gris associés aux 4 types d'éléments (sol et couronne à l'ombre et éclairé) de réflectance connue a priori en fonction des configurations angulaires solaire et d'observation. L'étude qui suit montre l'influence de la précision du modèle de transfert radiatif utilisé, en soulignant le fait qu'une modélisation « approximative » peut entraîner des erreurs relativement importantes sur l'information texturale des images simulées. Pour cela, nous avons comparé l'information texturale d'une image DART correspondant à la « configuration de base » d'une plantation forestière, simulée avec 255 niveaux radiométriques (Fig. 3-16a), avec 4 images (Fig. 3-16b) de la même scène comprenant seulement 4 types d'éléments « N_1: sol à l'ombre », « N_2: couronne à l'ombre», « N_3: couronne éclairée» et « N_4: sol éclairé» (Tableau 3-7).



a) b)

Figure 3-16:

Image DART d'une plantation forestière simulée avec a) 255 et b) 4 niveaux de gris.

Ces dernières images résultent d'une dégradation radiométrique de l'image DART:

- Image N°1: la dynamique radiométrique de l'image DART a été conservée et les valeurs intermédiaires ont été fixées à des valeurs moyennes.
- Image N°2: la dynamique radiométrique est plus faible que celle de l'image DART et les valeurs intermédiaires ne correspondent pas à les valeurs moyennes.
- Image N°3: les niveaux radiométriques sont moyens par rapport à l'image DART.
- Image N°4: les valeurs des 4 niveaux ont été affectées de manière linéaire.

		Images Seuillées			
	Image DART	Image N°1	Image N°2	Image N°3	Image N°4
N_1: sol à l'ombre	0/50	0	25	25	0
N_2: couronne à l'ombre	51/150	100	64	100	64
N_3: couronne éclairée	151/253	202	128	202	128
N_4: sol éclairé	254/255	255	200	255	255

Tableau 3-7: Radiométrie (CN) d'une image DART à 255 niveaux de gris (Réfl=0.00029484*CN+0.000656) et de 4 images représentant la même scène avec 4 niveaux de gris.

Les variogrammes verticaux et horizontaux associés à ces images sont présentés dans la figure 3-17. Ils ont été ajustés conformément aux résultats obtenus, à un modèle exponentiel.

On remarque que les variogrammes verticaux ou horizontaux varient beaucoup (oscillations plus ou moins marquées, hauteur du palier) en fonction du seuillage choisi: une différence relative de près de 64% sur la hauteur du palier est atteinte dans le cas de l'image

N°2 pour laquelle la dynamique radiométrique est réduite par rapport à l'image DART. Les variogrammes verticaux et horizontaux qui présentent les différences minimales (portée, palier, forme et hauteur des oscillations) correspondent à ceux de l'image N°1 pour laquelle la dynamique est identique à celle de l'image DART. Cependant, la modification d'un seul niveau (N_1 dans l'image N°3) entraîne une différence de hauteur du palier de l'ordre de 20% et de 35% dans le cas de 2 niveaux (N_2 et N_3 dans l'image N°4). Ces résultats soulignent donc l'intérêt d'une modélisation précise. L'utilisation de modèles géométriques simples est donc réduite car elle suppose la connaissance a priori des réflectances des éléments du couvert .

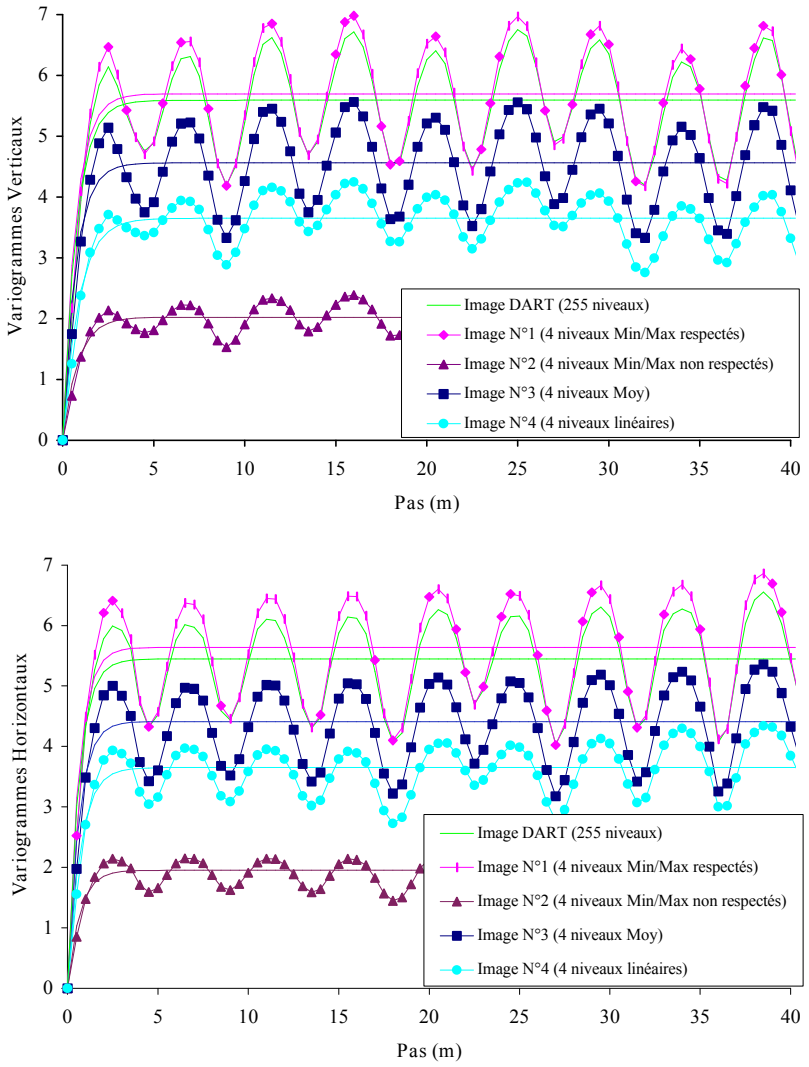


Figure 3-17:

Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART réalisées avec 255 ou 4 niveaux de gris. Les modèles exponentiels associés sont représentés.

			Images Seuillées							
	Image DART		Image N°1		Image N°2		Image N°3		Image N°4	
	VV	VH	VV	VH	VV	VH	VV	VH	VV	VH
V_0 ou palier	5.59	5.44	5.70	5.64	2.02	1.95	4.56	4.41	3.65	3.66
V_1 ou indicateur de portée	1.33	1.62	1.40	1.64	1.22	1.50	1.39	1.62	1.12	1.43

Tableau 3-8: Paliers et portées de simulations DART d'une plantation réalisées avec 255 ou 4 niveaux de gris.

IV.2. Influence de l'ordre de diffusion

IV.2.1. Simulations dans le visible

La figure 3-18 représente les variogrammes de simulations DART de la maquette « de base » calculés pour 1, 2, et 3 itérations et un SKYL nul (rayonnement solaire direct).

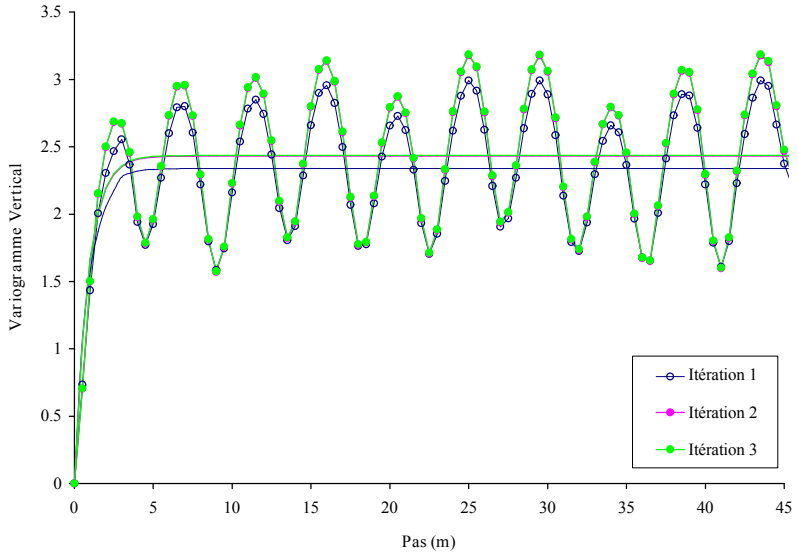


Figure 3-18: Variogrammes de simulations DART dans le visible pour 3 itérations. Les trois modèles exponentiels associés sont représentés. SKYL = 0%.

Les variogrammes ont été ajustés à un modèle exponentiel pour déterminer les valeurs des paliers. On constate que les paliers des itérations 2 et 3 sont quasiment confondus et que la différence relative entre les paliers des itérations 1 et 2 est seulement de 3.5%. Cette différence est beaucoup plus faible que celle observée entre les réflectances moyennes des images des deux premières itérations (≈ 10%). D'autre part, l'indicateur de portée V_1 estimé avec le modèle exponentiel évolue entre 1.09 et 1.15 soit de l'ordre de 5%. Une seule itération DART conduit donc à une bonne précision des principales caractéristiques des variogrammes dans le domaine spectral du visible en l'absence de rayonnement atmosphérique (SKYL=0%).

L'influence du rayonnement atmosphérique sur l'information texturale a été évaluée en considérant du rayonnement atmosphérique isotrope de SKYL égal à 25%.

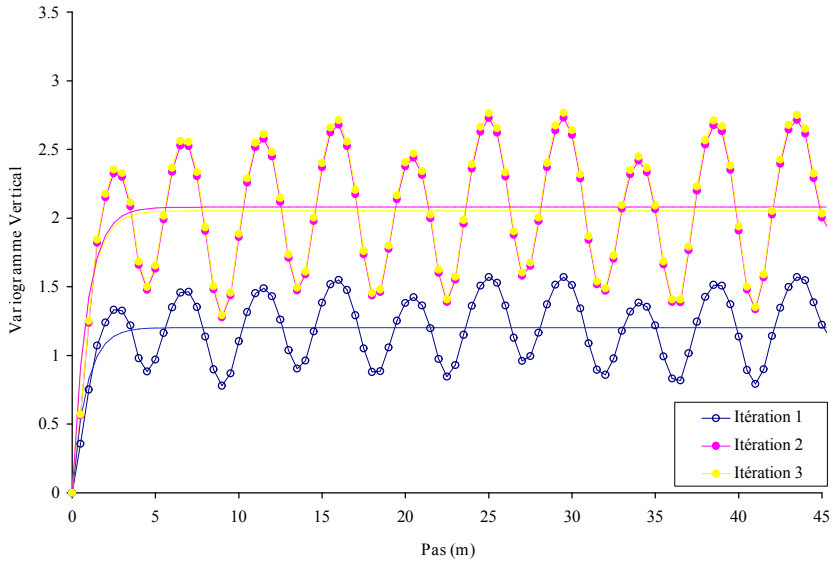


Figure 3-19: Variogrammes de simulations DART dans le visible pour 3 itérations. Les modèles exponentiels sont représentés. SKYL = 25%.

La figure 3-19 illustre le fait qu'une seule itération (diffusion d'ordre 1 du rayonnement direct) fournit une information texturale imprécise. Ainsi, la différence relative entre les paliers des variogrammes des itérations 1 et 2 est proche de 50%. Cette différence devient inférieure à 1% entre les itérations 2 et 3. Deux itérations sont donc nécessaires pour analyser l'information texturale dérivée de simulations DART obtenues avec un SKYL de 25%. Les résultats sont identiques pour un SKYL de 50%.

IV.2.2. Simulations dans le proche infrarouge

La même étude a été conduite dans le domaine spectral du proche infrarouge avec le paramètre SKYL = 0%. L'évolution des variogrammes associés aux itérations 1 à 4 (Fig. 3-20) montre que trois itérations fournissent une évaluation précise du palier. En effet, l'erreur relative commise entre les itérations 3 et 4 est inférieure à 0.5%.

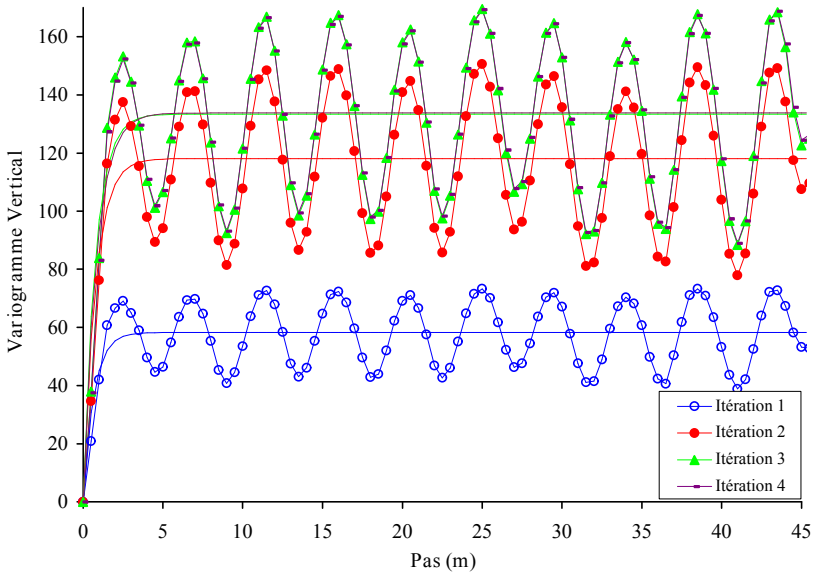


Figure 3-20: Variogrammes de simulations DART dans le proche infrarouge pour 4 itérations. Les modèles exponentiels sont représentés.

IV.3. Influence du taux de couverture

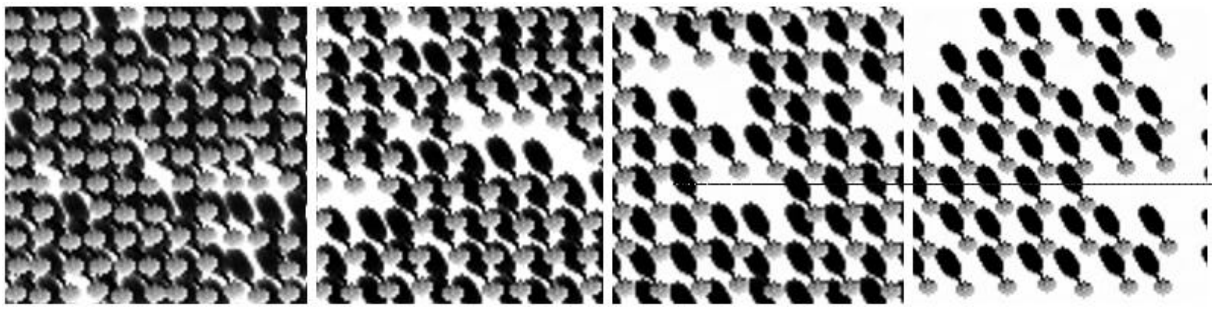
L'influence du taux de couverture a été évaluée en modifiant d'une part, l'espacement entre les rangées d'arbres, et par suite la densité d'arbres dans la parcelle et d'autre part, le diamètre des couronnes.

IV.3.1. Espacement entre les rangées d'arbres

Les simulations (Fig. 3-21) ont été conduites dans le domaine du visible pour quatre espacements Δ (4.5 m, 5.5 m, 6.5 m et 7.5 m), en maintenant, soit (1) l'indice foliaire constant, soit (2) la densité volumique foliaire (U_f) constante. Le taux de couverture varie ainsi de 10.5% pour $\Delta = 7.5$ m à 36.3% pour $\Delta = 4.5$ m. De plus, la probabilité de trouver un arbre aux croisements des rangées est égale à 90% quelque soit l'espacement considéré. Huit simulations, et donc huit variogrammes verticaux et horizontaux, ont été calculés. Les valeurs de la réflectance moyenne de la parcelle sont indiquées dans le tableau 3-9.

A indice foliaire constant, l'augmentation de l'inter-rang diminue la densité d'arbres dans la scène et par conséquent, diminue le nombre de cellules « feuille » de 47.630 pour $\Delta = 4.5$ m à 18.186 pour $\Delta = 7.5$ m. Cette diminution du volume foliaire nécessite une augmentation de la densité foliaire pour conserver un LAI constant sur la scène. Ainsi, pour un LAI de 2.92, la densité volumique foliaire varie de 0.35 m^{-1} pour $\Delta = 4.5$ m à 2.12 m^{-1} pour

Δ = 7.5 m. Inversement, une modélisation à densité foliaire constante diminue l'indice foliaire de la parcelle lorsque l'espacement entre les arbres croît. Ainsi, pour une densité foliaire de 0.35, le LAI de la parcelle varie entre 0.501 pour Δ = 7.5 m et 2.925 pour Δ = 4.5 m.



a) b) c) d)

Figure 3-21: Simulations DART dans le visible de plantations de pins avec des espacements entre les rangées d'arbres égaux à a) 4.5 m, b) 5.5 m, c) 6.5 m et d) 7.5 m. LAI=2.92.

IV.3.1.1. Parcelles à indice foliaire constant

L'indice foliaire de la canopée est fixé à 2.92. La figure 3-22 représente les profils radiométriques moyens (CN) selon un transect perpendiculaire aux rangées d'arbres pour Δ = 5.5 m, 6.5 m et 7.5 m. Conformément aux résultats théoriques de §.III., chaque profil présente une forme périodique en « créneau ». L'amplitude du « créneau », exprimée en terme de différence de réflectance δR, augmente avec l'espacement entre les rangées d'arbres: δR = 3.4% pour Δ = 5.5 m, δR = 4.1% pour Δ = 6.5 m et δR = 4.3% pour Δ = 7.5 m, ce qui modifie la variance de l'image.

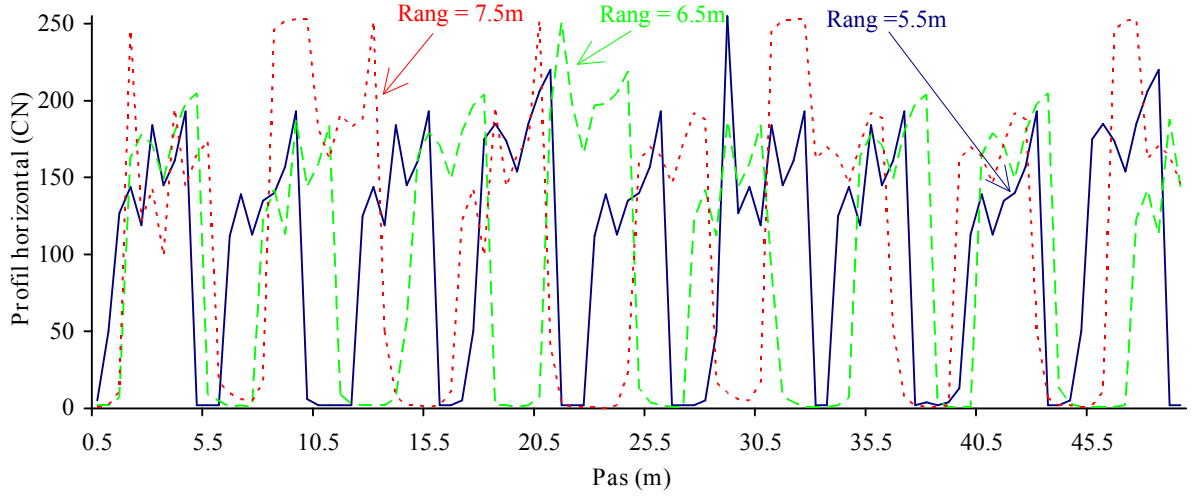
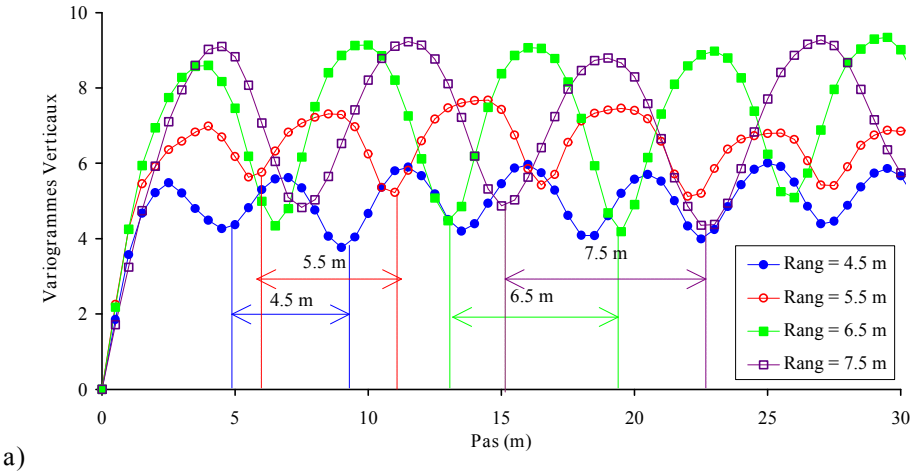


Figure 3-22: Profils horizontaux radiométriques (CN) moyens d'images DART. La scène comprend des rangées d'arbres espacées de 5.5 m ( ), 6.5 m (- -) et 7.5 m ( ). La réflectance est donnée par R=0.065.CN/255.

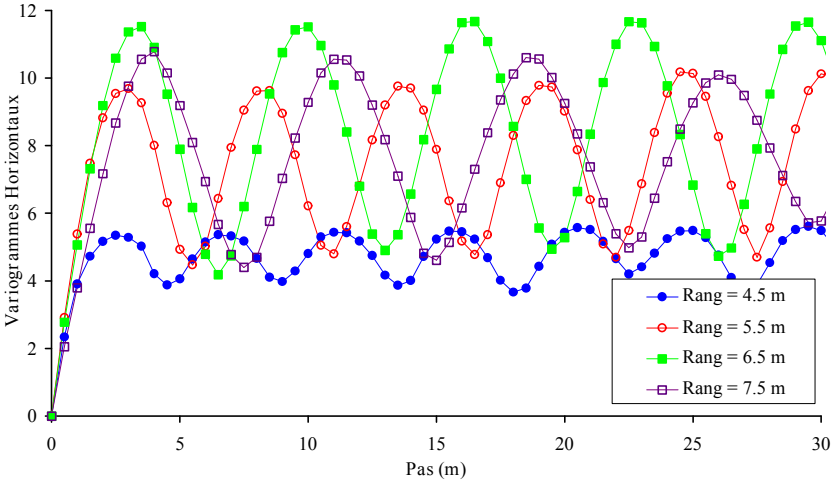
Les variogrammes (Fig. 3-23) des 4 parcelles simulées présentent des oscillations de période et amplitude variables, centrées sur des valeurs moyennes (palier) différentes, selon Δ:

- Conformément aux résultats de l'étude schématique préliminaire, la période est égale à l'écart entre les rangées d'arbres.
- La portée représentée avec le modèle exponentiel par $1/V_1$ augmente avec l'écart entre les rangées. Cet indicateur évolue de la même façon que la période.

- L'amplitude des oscillations tend à croître avec l'augmentation de Δ, du fait de l'augmentation de la différence de réflectance entre les couronnes et l'espace entre les rangées (Fig. 3-22). Les variations des paliers des variogrammes sont similaires aux variations de la variance des images. Les valeurs sont cependant différentes. Avec l'augmentation de Δ, la variance des images augmente, passe par un maximum pour Δ = 6.5 m puis décroît légèrement (Tableau 3-9). En effet, si la distance entre les rangées augmente beaucoup, l'image devient homogène (il ne reste que du sous-bois) et la variance tend vers la valeur 0.



a)

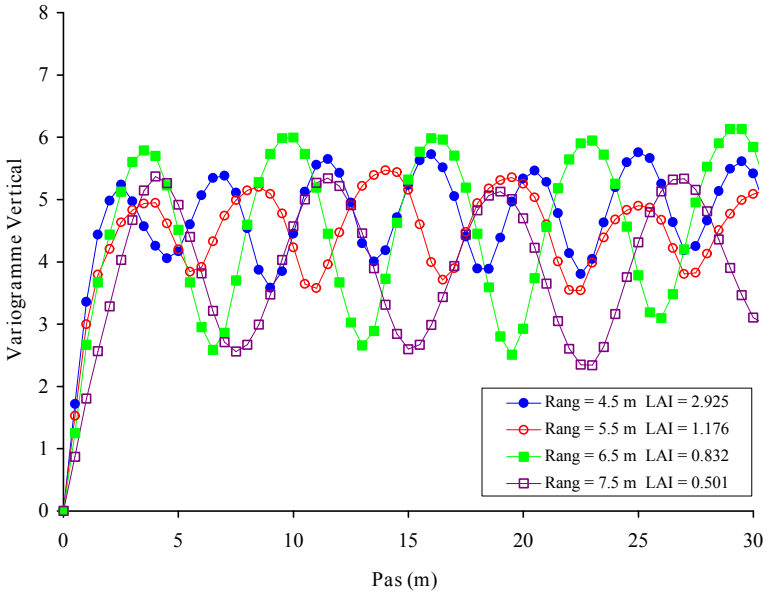


b)

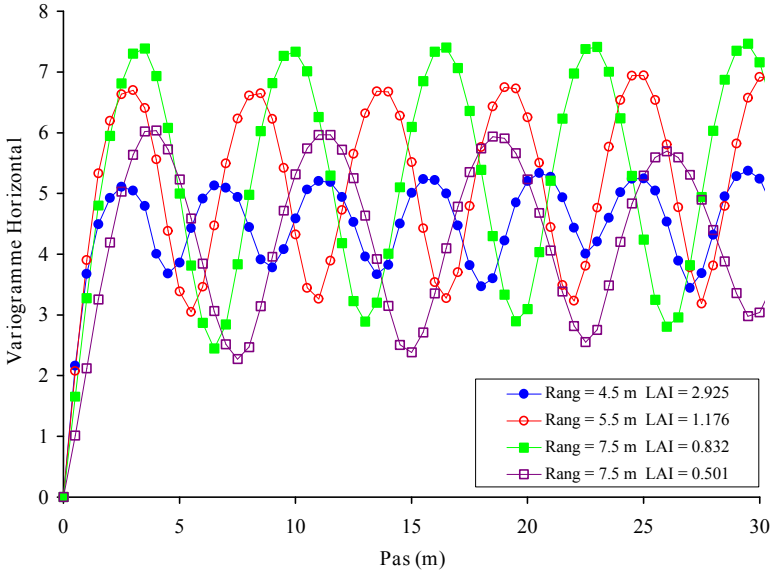
Figure 3-23: Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART de plantations à indice foliaire constant (LAI=2.92) pour = 4.5 m, 5.5 m, 6.5 m et 7.5 m.

IV.3.1.2. Parcelles à densité volumique foliaire constante

Les différents variogrammes obtenus (Fig. 3-24) présentent toutes les tendances observées dans le premier cas d'étude (palier, portée, période). La simulation à densité volumique foliaire u_f implique que la surface foliaire et donc la réflectance des houppiers reste constante pour tout u_f. La différence de réflectance entre les houppiers et le sous-bois est donc sensiblement constante. Seule la proportion de ces éléments est modifiée. Ceci explique que les paliers moyens des variogrammes d'images ainsi simulées soient inférieurs à ceux obtenus en maintenant le LAI constant et que leur dynamique soit plus faible (Tableau 3-9). Cet aspect corrobore le fait qu'un fort indice foliaire améliore le contraste des images. En effet, plus l'indice foliaire de la parcelle augmente, l'indice foliaire du sous-bois restant constant, plus les couches supérieures de la canopée diffusent le rayonnement solaire, augmentant ainsi la différence de réflectance entre les arbres et le sous-bois. Cet aspect est développé ultérieurement avec l'étude de la sensibilité des variogrammes au LAI du couvert.



a)



b)

Figure 3-24:

Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART de plantations à densité foliaire constante (u_f= 0.35) pour = 4.5 m, 5.5 m, 6.5 m et 7.5 m.

	Espacement	4.5m		5.5m		6.5m		7.5m	
	Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H
LAI constant	V_0 ou palier	5.00	4.84	6.31	7.60	7.24	8.37	7.21	8.00
	V_1 ou indicateur de portée	1.3	1.7	1.2	1.7	1.1	1.4	0.9	1.0
	Variance	5.42		7.86		9.23		8.72	
	Réfl. moyenne	2.78		3.24		3.82		4.83	
U_f constante	V_0 ou palier	5.00	4.84	4.60	5.18	4.78	5.42	4.06	4.32
	V_1 ou indicateur de portée	1.3	1.7	1.1	1.7	1.1	1.4	0.9	1.1
	Variance	5.42		5.43		5.71		4.75	
	Réfl. moyenne	2.78		4.17		4.69		5.52	

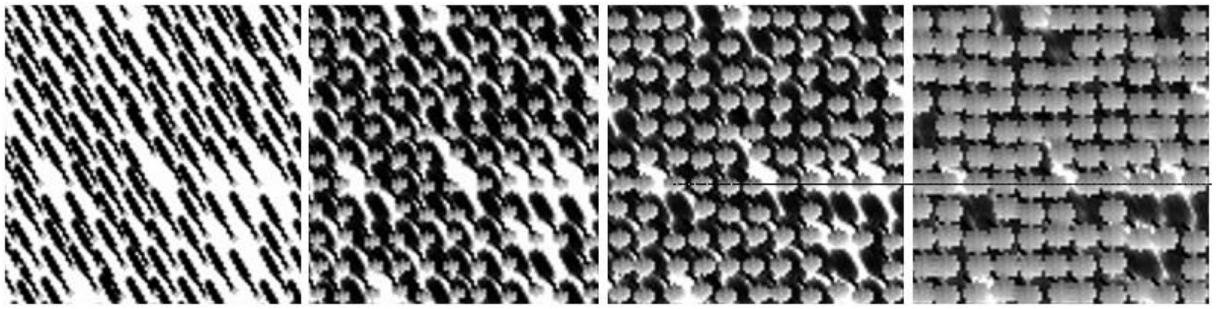
Tableau 3-9: Variance et réflectance moyenne des images DART. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés pour des parcelles à LAI constant et densité foliaire (U_f) constante (Fig. 3-24).

Les variogrammes de plantations régulières sont donc très sensibles à la distance Δ entre les rangées d'arbres. Dans le cas d'images à haute résolution spatiale, cette distance peut être évaluée à l'aide de l'information texturale: elle est égale à la période des variogrammes.

IV.3.2. Diamètre des couronnes

Le diamètre (∅) des houppiers est un paramètre structural majeur de part son influence sur le taux de couverture arboré. La sensibilité de l'information texturale à ce paramètre a été évaluée avec un éclairement solaire direct dans les domaines du vert et du proche infrarouge.

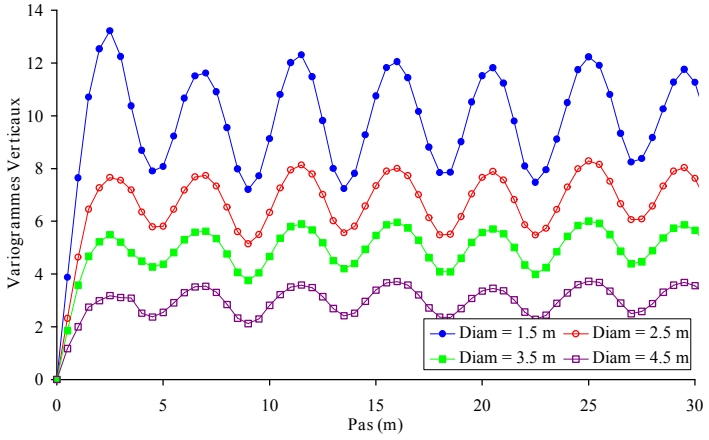
IV.3.2.1. Simulations dans le visible



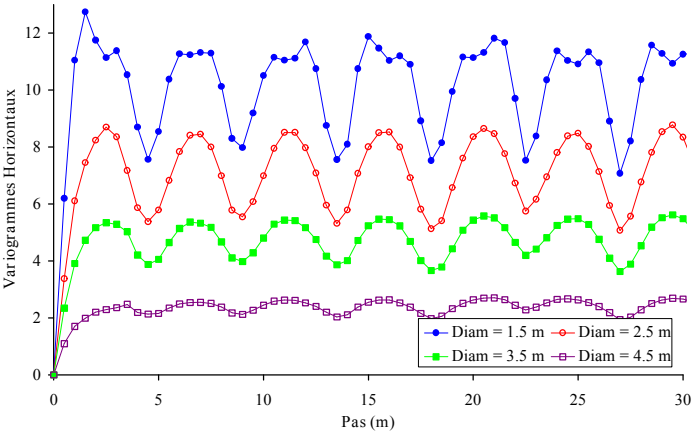
a) b) c) d)

Figure 3-25: Simulations DART de plantations de pins (LAI=2.92). Les diamètres des houppiers sont égaux à a) 1.5 m, b) 2.5 m, c) 3.5 m et d) 4.5 m.

Les simulations ont été conduites pour 4 diamètres de couronnes (1.5 m, 2.5 m, 3.5 m et 4.5 m) sur des parcelles à (1) LAI (Fig. 3-25) et à (2) densité volumique foliaire constante. Le taux de couverture varie ainsi entre 5.5% et 61.6% pour des diamètres respectivement égaux à 1.5 m et 4.5 m. Les réflectances moyennes des parcelles sont indiquées dans le tableau 3-10.



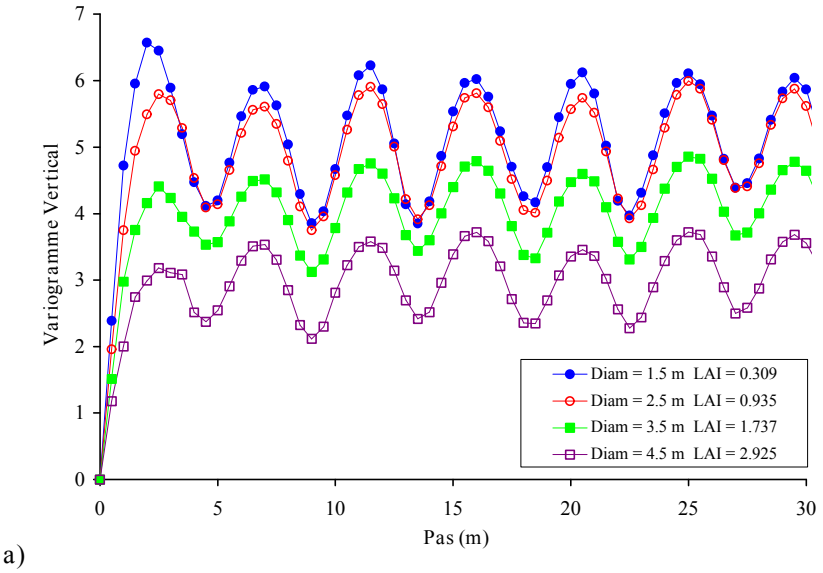
a)



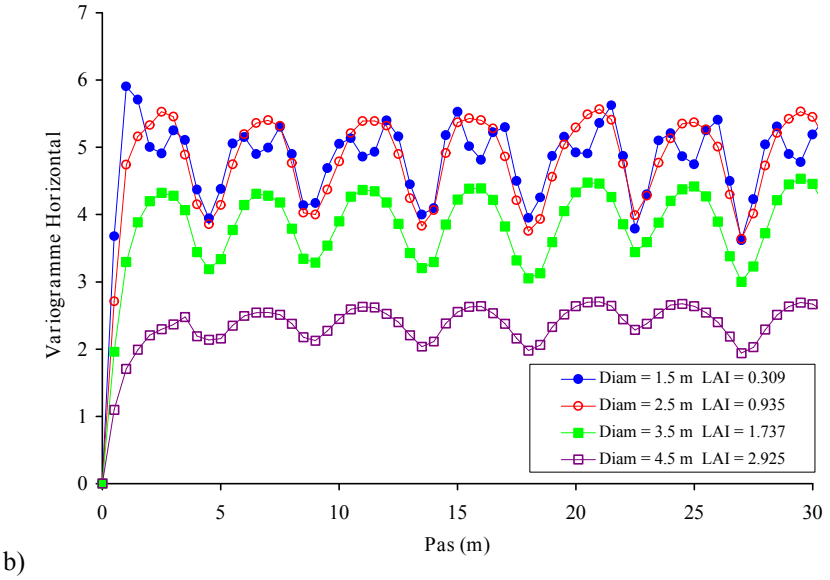
b)

Figure 3-26:

Influence du diamètre des couronnes des arbres. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le visible. Simulations de parcelles de pins à indice foliaire constant (LAI = 2.92 ; u_f varie de 0.36 m^{-1} à 3.45 m^{-1}).



a)



b)

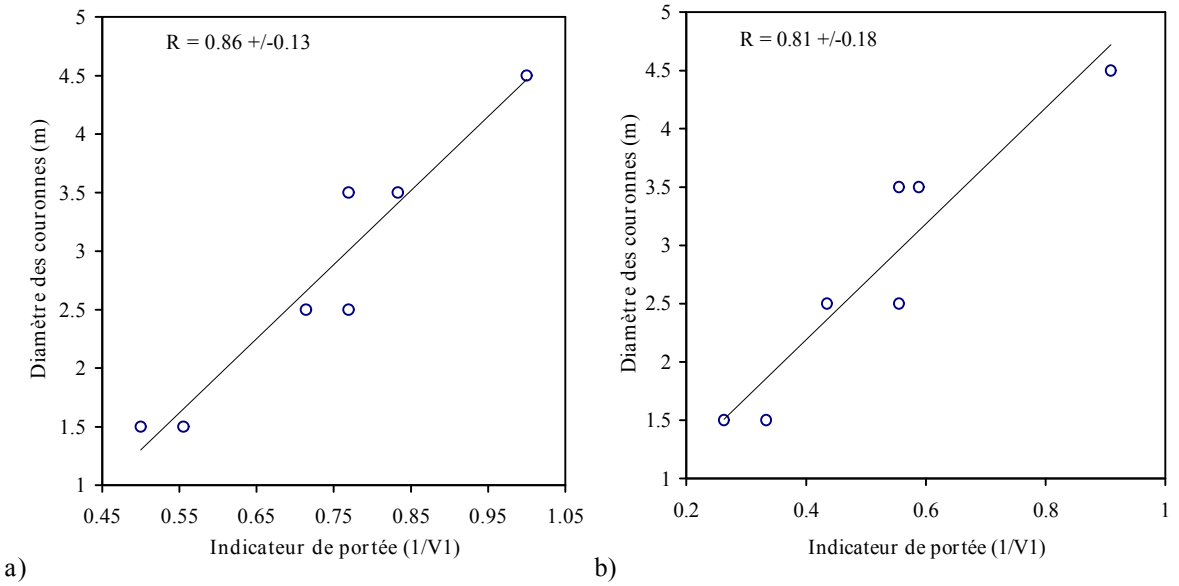
Figure 3-27:

Influence du diamètre des couronnes des arbres. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le visible. Simulations de parcelles de pins à densité foliaire constante (u_f = 0.36 m^{-1}; LAI varie de 0.31 à 2.92).

Les variogrammes verticaux et horizontaux (Fig3-26 et 3-27) montrent que:

- la distance Δ entre les rangées est bien égale à la période des variogrammes.
- les paliers des variogrammes (Tableau 3-13) ont des valeurs proches mais différentes de la variance des images (cf. §.III.2.1.). Les paliers des variogrammes verticaux sont plus forts que ceux des variogrammes horizontaux. La configuration géométrique « direction d'éclairement - architecture du couvert », c'est à dire la distribution spatiale des ombres et des surfaces éclairées, explique ces différences. Les paliers diminuent fortement avec l'accroissement du diamètre des houppiers car les images deviennent plus homogènes avec l'augmentation de ∅ et donc du taux de couverture.
- l'amplitude des oscillations périodiques augmente si les diamètres diminuent. En effet, la diminution de ∅ tend à rendre égales les proportions de surfaces claires et sombres ce qui augmente la variance. Ainsi, la diminution du diamètre des couronnes augmente beaucoup les surfaces de sol éclairé, diminue les surfaces de teintes intermédiaires (houppiers) et modifie peu les surfaces à l'ombre. Ces dernières tendent à augmenter car elles sont de moins en moins masquées par les houppiers et à diminuer de par la dimension des houppiers.

- la portée $1/V_1$ évolue de la même façon que la taille des couronnes (Fig. 3-28). Le coefficient de corrélation R entre la portée ($1/V_1$) et le diamètre est égal à 86% ± 13% et à 81% ± 18% dans le cas respectivement des variogrammes verticaux et horizontaux et pour un intervalle de confiance à 90%. Les relations prédictives sont toutefois différentes pour les 2 types de variogrammes.



a) b)

Figure 3-28: Relation entre le diamètre des couronnes et les portées des variogrammes a) verticaux et b) horizontaux. Les points de mesures correspondent aux simulations DART dans le visible pour une plantation forestière à indice foliaire ou densité foliaire constant.

Les tendances observées sont similaires pour les simulations à LAI constant ou à U_f constante. Cependant, on constate que le palier et l'amplitude des simulations sont plus importants dans le cas « LAI constant ». En effet, à LAI constant les densités volumiques foliaires augmentent avec la diminution du diamètre des couronnes ; les houppiers deviennent très opaques. Les ombres sont alors plus marquées et les houppiers plus clairs, ce qui a tendance à fortement augmenter la variance (Tableau 3-10). La différence de réflectance entre le sous-bois et les houppiers ainsi que l'amplitude des oscillations périodiques augmentent avec la diminution du diamètre (Fig. 3-29). Par contre, à U_f constante, les houppiers sont plus « transparents » si le diamètre décroît. Les ombres sont alors moins prononcées ce qui explique que l'amplitude des oscillations, la variance et par suite les paliers des variogrammes sont plus faibles que dans le cas «LAI constant» (Tableau 3-10).

	Diamètre	1.5m		2.5m		3.5m		4.5m	
	Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H
LAI constant	V_0 ou palier	10.03	10.23	6.86	7.21	5.00	4.84	3.00	2.44
	V_1 ou indicateur de portée	2	3	1.3	1.8	1.3	1.7	1.0	1.1
	Variance	10.26		7.41		5.42		3.17	
U_f constante	V_0 ou palier	5.60	4.84	5.22	4.82	4.25	3.89	3.00	2.44
	V_1 ou indicateur de portée	1.8	3.8	1.4	2.3	1.2	1.8	1.0	1.1
	Variance	4.99		5.10		4.37		3.17	

Tableau 3-10: Variance des images DART. Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés dans le cas de parcelles à LAI constant et densité foliaire constante (Fig. 3-27).

Le comportement des variogrammes mentionnés ci-dessous s'explique par les variations de réflectances des surfaces éclairées et à l'ombre (Tableau 3-10):

- Sol éclairé: la réflectance est constante avec l'accroissement de la couronne compte tenu du fait que l'on considère une diffusion avec le modèle DART.
- Sol à l'ombre: la réflectance augmente avec le diamètre dans le cas « LAI constant » car les couronnes deviennent de moins en moins opaques. Par contre, à « U_f constante », la transmission du rayonnement solaire est de plus en plus réduite et de ce fait les ombres sont de plus en plus sombres.
- Couronne: la réflectance diminue quelque soit le cas, avec l'augmentation de la taille des couronnes: En effet, à « LAI constant », l'accroissement de la couronne implique deux tendances antagonistes de la réflectance liées à (1) une diminution du rayonnement réfléchi par les éléments foliaires du houppier du fait de la diminution de la densité foliaire et à (2) une augmentation du rayonnement réfléchi par le sous-bois à travers le houppier compte tenu d'une plus forte transmission. Cependant, la réflectance moyenne du sol étant plus faible que celle des couronnes, le deuxième effet ne permet pas de compenser la diminution de la réflectance des houppiers. Le cas à « U_f constant » est différent: avec l'augmentation du diamètre de la couronne, la densité foliaire restant constante, le rayonnement réfléchi par le sous-bois est fortement atténué à travers le houppier alors que le rayonnement réfléchi par les éléments foliaires du houppier augmente mais dans des proportions qui ne permettent pas de compenser la diminution.

	1.5m		2.5m		3.5m		4.5m	
	LAI cst	U_f cst	LAI cst	U_f cst	LAI cst	U_f cst	LAI cst	U_f cst
Réfl $_{moyenne}$	3.96	5.32	2.84	4.09	2.78	3.39	3.12	3.12
Réfl $_{sol\ éclairé}$	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94
Réfl $_{sol\ à\ l'ombre}$	0.04	3.04	0.19	2.01	0.34	1.11	0.65	0.65
Réfl $_{houppier}$	4.77	5.94	4.40	5.24	4.37	4.68	4.24	4.24

Tableau 3-11: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des parcelles simulées pour différents diamètres de couronnes (1.5 à 4.5m) et avec un LAI ou une densité volumique foliaire constante.

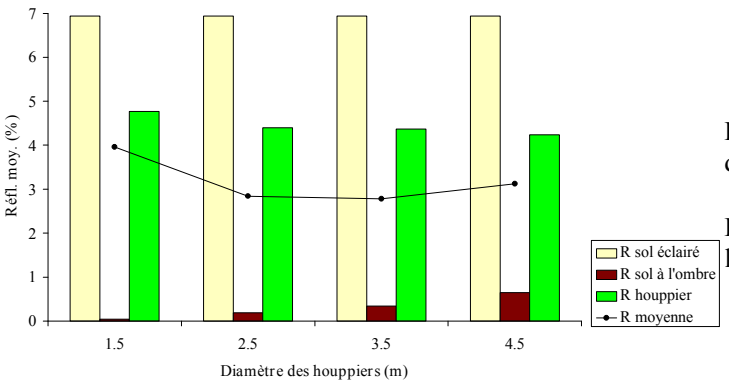
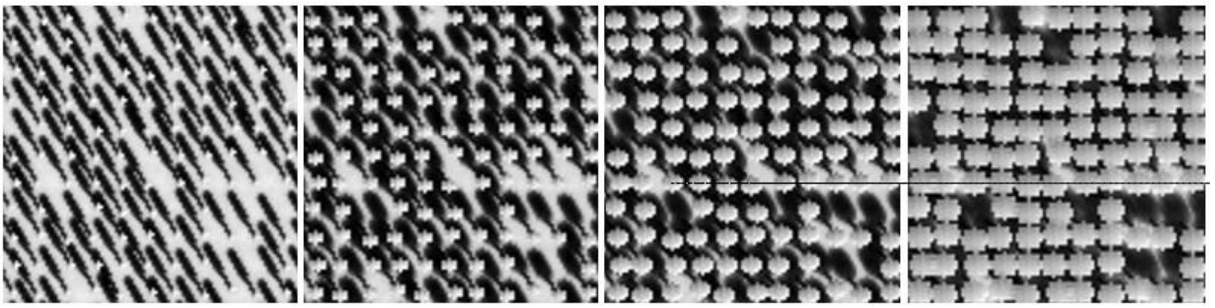


Figure 3-29: Réflectances (R) moyennes (%) du sol éclairé, sol à l'ombre et houppier pour = 1.5 m à 4.5 m et LAI constant. L'écart R(sol) - R(houppier) diminue avec l'accroissement du diamètre.

En conclusion, les variogrammes visibles sont très sensibles aux dimensions des houppiers et par suite au taux de couverture. L'agrandissement de la taille de la couronne des arbres homogénéise peu à peu la scène ce qui diminue le palier des variogrammes et l'amplitude des oscillations. Les portées semblent bien corrélées aux diamètres des couronnes.

IV.3.2.2. Simulations dans le proche infrarouge

Les parcelles simulées (Fig. 3-30) dans le proche infrarouge sont identiques à celles de l'étude précédente dans le cas LAI constant.



a) b) c) d)

Figure 3-30: Simulations DART de parcelles de pins pour des diamètres de couronnes égaux à a) 1.5 m, b) 2.5 m, c) 3.5 m et d) 4.5 m. LAI=2.92.

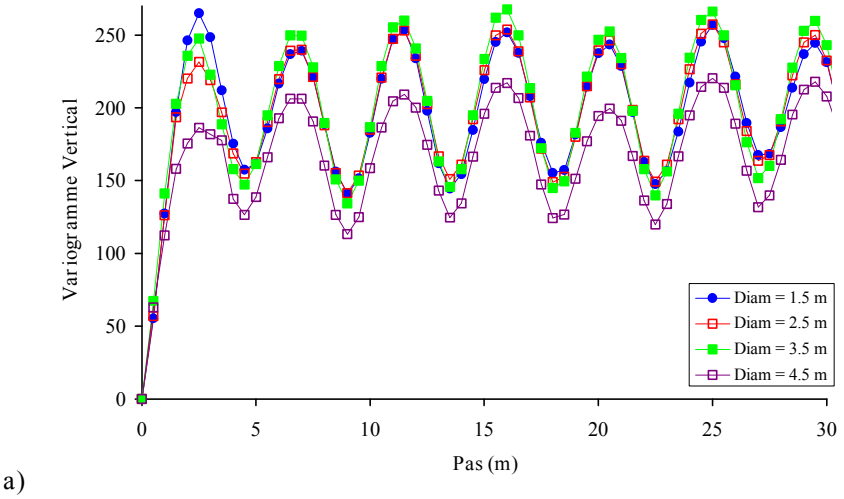
Les variogrammes (Fig. 3-31) présentent des tendances similaires au visible: les paliers et les oscillations tendent à diminuer avec l'accroissement des couronnes. Ainsi, la variabilité radiométrique dans l'image est principalement due au sol éclairé et au sol à l'ombre si $\varnothing = 1.5$ m alors qu'elle est surtout due aux houppiers et au sol à l'ombre si $\varnothing = 4.5$ m. Les différences de réflectance (Tableau 3-12) entre ces éléments de surface majoritaires sont alors 30.38% si $\varnothing = 1.5$ m et 21.62% si $\varnothing = 4.5$ m. La différence de réflectance diminue donc lorsque l'on passe de $\varnothing = 1.5$ m à $\varnothing = 4.5$ m, ce qui implique une diminution du palier et des oscillations. Cette tendance semble plus marquée pour les variogrammes horizontaux. Comme pour le visible, les paliers des variogrammes verticaux ont des valeurs plus proches de la variance de l'image que ceux des variogrammes horizontaux. Par contre, les paliers (Tableau 3-13) sont plus forts que dans le visible en raison des plus grandes différences de réflectance entre les surfaces éclairées et à l'ombre. Les portées $1/V_1$ des variogrammes horizontaux suivent les mêmes tendances que celles du visible: elles augmentent avec le diamètre des couronnes. Dans le cas des variogrammes verticaux, aucune tendance ne semble se dégager.

Diamètre	1.5 m	2.5 m	3.5 m	4.5 m
Réfl $_{\text{moyenne}}$	28.8	23.6	24.5	29.2
Réfl $_{\text{sol éclairé}}$	33.8	34.2	33.5	33.2
Réfl $_{\text{sol à l'ombre}}$	9.0	9.1	10.2	13.0
Réfl $_{\text{houppier}}$	49.3	44.8	42.9	42.70

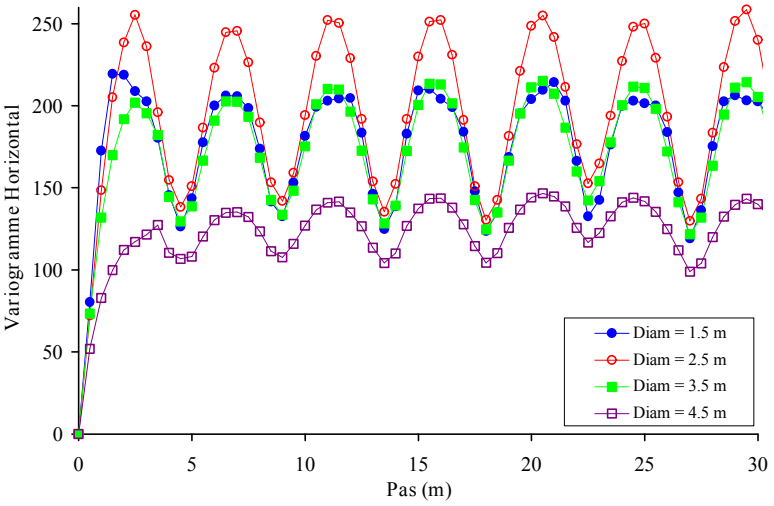
Tableau 3-12: Réflectances PIR moyennes (%) totale et des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers de parcelles pour des diamètres de couronnes entre 1.5 et 4.5m. LAI = 2.92.

Diamètre	1.5 m		2.5 m		3.5 m		4.5 m	
Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H
V_0 ou palier	209.0	194.9	203.7	196.5	207.0	175.0	183.2	130.1
V_1 ou indicateur de portée	1.61	2.14	1.48	1.69	1.69	1.61	1.50	1.01
Variance	244.5		264.2		240.2		214.4	

Tableau 3-13: Variance d'images DART (PIR) (Fig. 3-31). Paliers et portées des variogrammes verticaux et horizontaux associés



a)

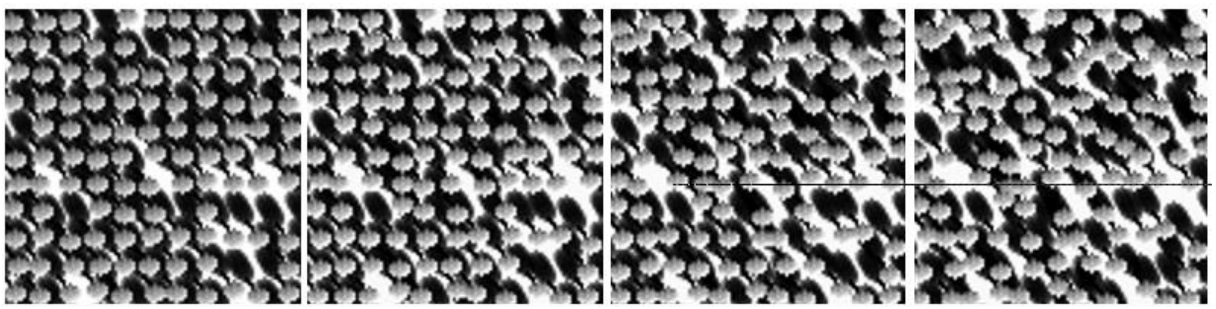


b)

Figure 3-31: Influence de . Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le PIR (LAI = 2.92).

IV.4. Influence de la position des arbres

L'influence de la position des arbres sur le comportement textural des images a été étudiée à partir de la scène « de base » dans le domaine spectral du visible (Fig. 3-32). Nous avons déplacé aléatoirement les arbres dans 4 disques de rayons (r) croissants (0.0 m, 0.5 m, 1.0 m et 1.5 m) et centrés sur leur position initiale de manière à dégrader progressivement leur alignement dans la plantation.

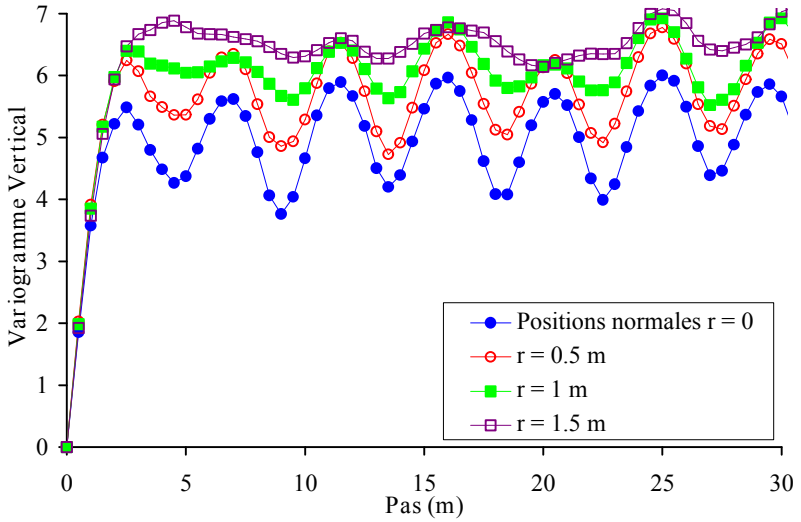


a) b) c) d)

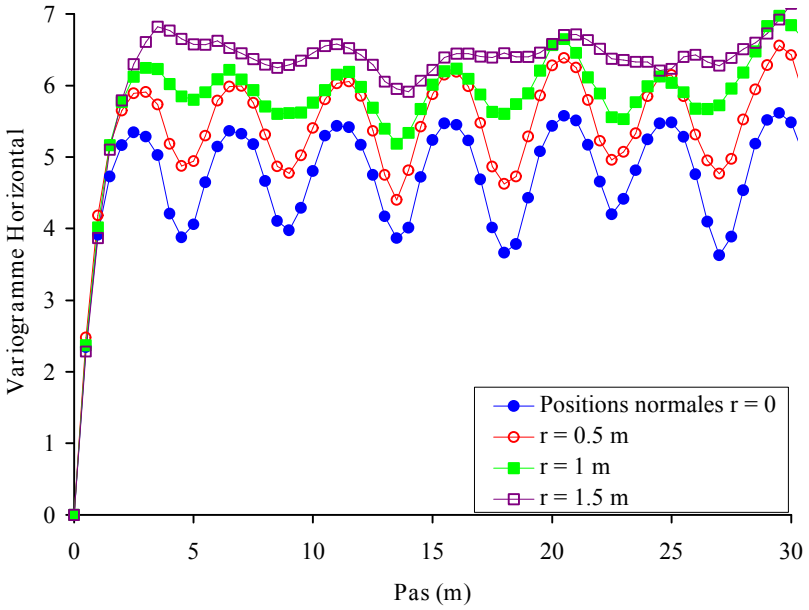
Figure 3-32: Simulations DART d'une plantation de pins: positions des arbres dans un rayon de a) 0.0 m, b) 0.5 m, c) 1.0 m et d) 1.5 m autour de la position initiale.

L'analyse des variogrammes verticaux et horizontaux (Fig. 3-33) montre:

- une diminution des caractéristiques périodiques avec l'accroissement du rayon car les rangées, et donc l'organisation périodique de la scène, disparaissent peu à peu.
- une augmentation du palier ainsi que de la variance avec le rayon (Tableau 3-15) car les proportions de surfaces claires et sombres tendent alors à s'égaliser. Cette tendance résulte d'une plus grande désorganisation spatiale des arbres. La surface de sol éclairée augmente de 6.8% si r = 0 à 15.1% si r = 1.5 m, alors que la surface de sol à l'ombre diminue relativement peu. De plus, la différence entre les réflectances extrêmes augmente. Les niveaux radiométriques des ombres tendent à diminuer en raison de la plus grande superposition d'ombres d'arbres voisins. Ainsi, la réflectance moyenne des zones à l'ombre est de 0.34% pour r = 0 et de 0.17% pour r = 1.5 m (Tableau 3-14).
- la portée $1/V_1$ augmente avec le rayon. Cependant, cette tendance n'est pas significative car le nombre de mesures est très réduit.



a)



b)

Figure 3-33:

Influence de la position des arbres dans les rangées. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART dans le visible. L'écart entre rangées est de 4.5 m.

Rayon	0.0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m
Réfl $_{moyenne}$	2.78	2.68	2.77	2.86
Réfl $_{sol\ éclairé}$	6.94	6.94	6.94	6.94
Réfl $_{sol\ à\ l'ombre}$	0.34	0.31	0.19	0.17
Réfl $_{houppier}$	4.37	4.18	4.09	4.05

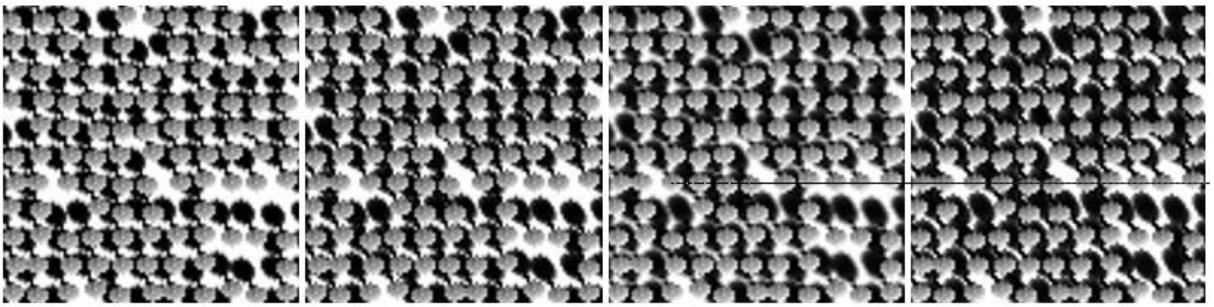
Tableau 3-14: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des parcelles simulées pour différents diamètres de couronnes (1.5 à 4.5m) et avec un LAI ou une densité volumique foliaire constante.

Rayon	0.0 m		0.5 m		1.0 m		1.5 m	
Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H
V_0 ou palier	5.00	4.84	5.75	5.64	6.16	6.08	6.58	6.55
V_1 ou indicateur de portée	1.3	1.7	1.2	1.5	1.1	1.2	0.9	1.1
Variance	5.42		5.83		5.99		6.17	

Tableau 3-15: Variance d'images DART (Fig. 3-33). Paliers et portées des variogrammes verticaux et horizontaux associés.

IV.5. Influence de la hauteur des arbres

Les simulations (Fig. 3-34) ont été effectuées dans le vert avec la scène de base pour 4 hauteurs (H) d'arbres (12 m, 13 m, 14 m et 15 m) et un LAI de 2.92. L'augmentation de hauteur conduit à (1) un plus grand volume foliaire et à (2) un allongement des ombres portées au sol. Le taux de couverture reste constant, les diamètres des couronnes ne variant pas.



a) b) c) d)

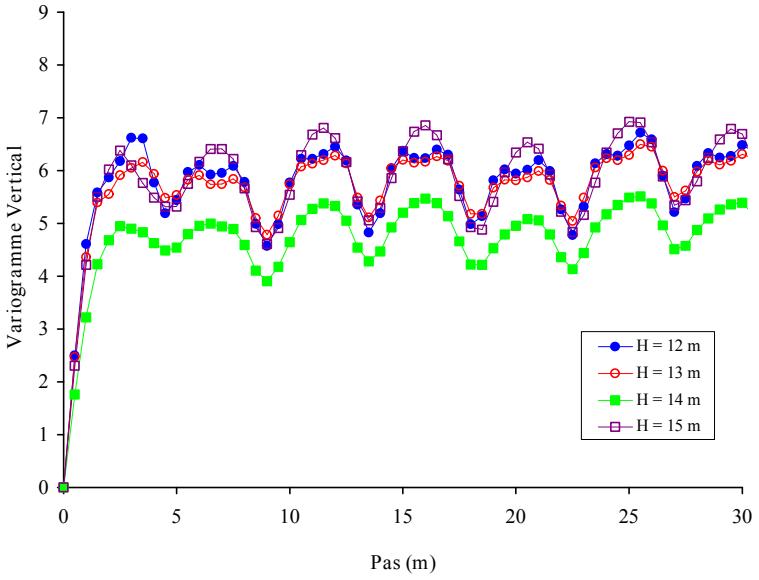
Figure 3-34: Simulations DART de plantations de pins de hauteur égale à a)12 m, b) 13 m, c) 14 m et d) 15 m.

Les variogrammes verticaux et horizontaux (Fig. 3-35) DART sont très similaires. Ils permettent de retrouver la périodicité des rangées d'arbres mais ne semblent pas présenter de relation simple entre la hauteur des arbres et la valeur des paliers. On constate toutefois:

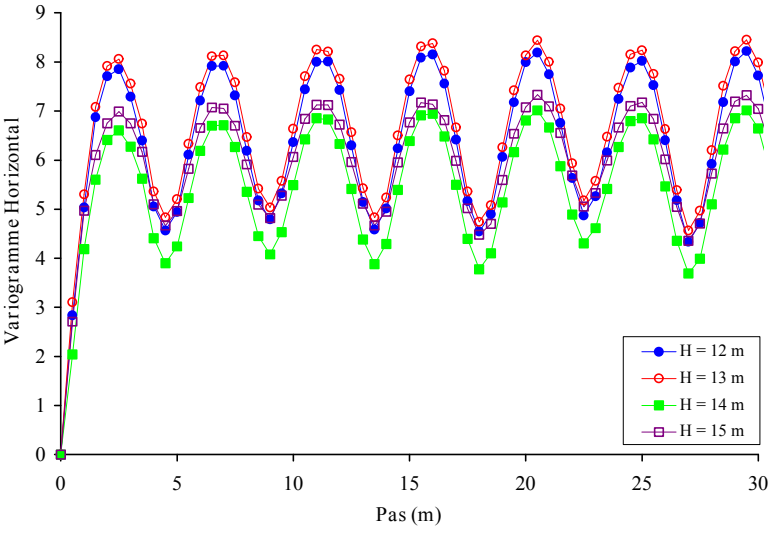
- un écrétage des oscillations des variogrammes verticaux.
- des oscillations plus grandes pour les variogrammes horizontaux. En effet, l'amplitude des oscillations est directement influencée par la différence de réflectance entre les houppiers et le sous-bois. De par la position du soleil, dans la direction horizontale, l'espace entre les rangées est le plus souvent à l'ombre des houppiers alors qu'il est plus souvent éclairé dans la direction verticale. La différence de réflectance entre les houppiers et le sous-bois éclairé est 3.29% alors qu'elle est de 4.16% avec le sous-bois à l'ombre. La plus forte différence de réflectance associée à la configuration horizontale induit donc de plus grandes oscillations.

Compte tenu des caractéristiques des arbres et des différences de hauteur simulées (12 à 15 m), le volume foliaire varie entre 2750 m^3 et 5033 m^3 alors que dans l'étude de sensibilité liée au diamètre des couronnes, celui-ci variait entre 1045 m^3 et 9859 m^3 pour une hauteur de 14.5 m. Cette faible variabilité du volume foliaire avec la hauteur des arbres implique que la radiométrie des ombres évolue moins, ce qui explique que les paliers des variogrammes sont très proches les uns des autres (Tableau 3-16). La variance des images évolue peu.

- une évolution non monotone de la portée avec la hauteur des arbres.



a)



b)

Figure 3-35:

Influence de H. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART (LAI = 2.92).

Hauteur	12m		13m		14m		15m	
Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H
V_0 ou palier	6.03	6.48	5.98	6.71	5.04	5.53	6.08	6.05
V_1 ou indicateur de portée	1.4	1.7	1.3	1.8	1.1	1.6	1.3	1.7
Variance	7.11		7.16		5.98		6.73	

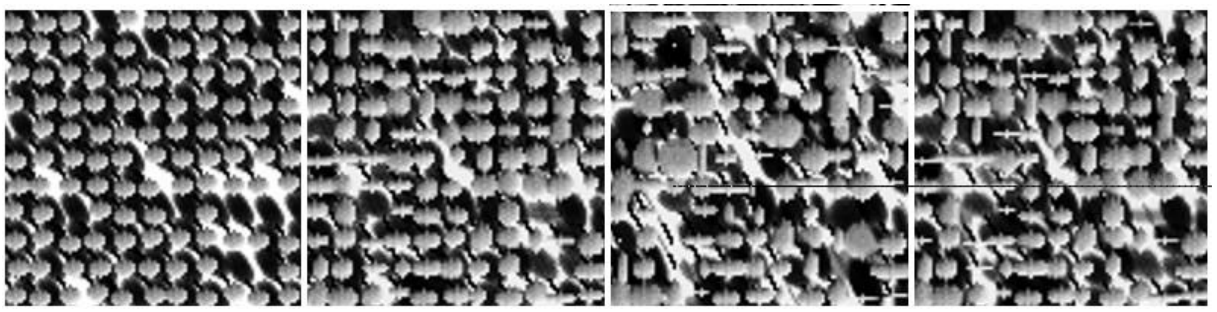
Tableau 3-16: Variance d'images DART (Fig. 3-35). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.

En conclusion, la hauteur des arbres modifie peu et/ou de manière uniforme la texture des images. Ce paramètre est donc difficilement identifiable et extractible dans nos cas d'étude.

IV.6. Influence de la variation simultanée de plusieurs paramètres structuraux

Les scènes sont modélisées de manière à introduire la variabilité naturelle de deux paramètres structuraux (hauteur des arbres et dimensions des couronnes), autour de valeurs moyennes, dans le cas de la scène de base. Quatre domaines de variation, c'est à dire quatre écart-types (± 0.0 m, ± 1.0 m, ± 1.5 m et ± 2.0 m), ont été considérés: loi gaussienne dans l'intervalle [valeur moyenne du paramètre ± 2.écart-type].

Le choix de cet intervalle correspondant à 95% des valeurs de la gaussienne, permet d'éliminer des valeurs extrêmes qui seraient impossibles dans la nature. Les valeurs des paramètres utilisés ont été choisies de manière indépendante, sans prise en compte des relations allométriques des arbres. Les positions des arbres sont restées similaires à celles de la scène de base. Les simulations (Fig3-36) ont été conduites dans le visible.



a) b) c) d)

Figure 3-36: Simulations DART de plantations de pins. Écart-types du diamètre et de la hauteur des couronnes: a) 0.0 m, b) 1.0 m, c) 1.5 m et d) 2.0 m. Les écart-types 1.5 m et 2 m sont irréalistes: ils impliquent des formes de houppiers inexistantes sur notre site d'étude.

Les variogrammes verticaux et horizontaux (Fig. 3-37) présentent:

- des paliers proches de celui de la maquette correspondant aux paramètres moyens. Toutefois, le palier associé au plus grand écart-type est un peu plus élevé. En effet, il augmente avec les modifications structurales du couvert qui induisent un plus grand désordre radiométrique et donc une plus grande variance de l'image (Tableau 3-17).
- une diminution des caractéristiques périodiques avec une variabilité croissante des paramètres structuraux. En effet, la déformation des couronnes occulte peu à peu le phénomène d'alignement des couronnes ce qui diminue le motif répétitif de la scène.

Écart-types	0.0 m		1.0 m		1.5 m		2.0 m	
Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H
V_0 ou palier	5.00	4.84	4.65	4.22	4.66	4.40	5.24	4.98
V_1 ou indicateur de portée	1.3	1.7	1.2	1.3	0.9	1.1	0.9	0.9
Variance	5.42		4.35		4.52		5.01	
Réfl. moyenne	2.78		2.72		2.75		2.85	

Tableau 3-17: Variance et réflectance moyenne d'images DART (Fig. 3-37). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.

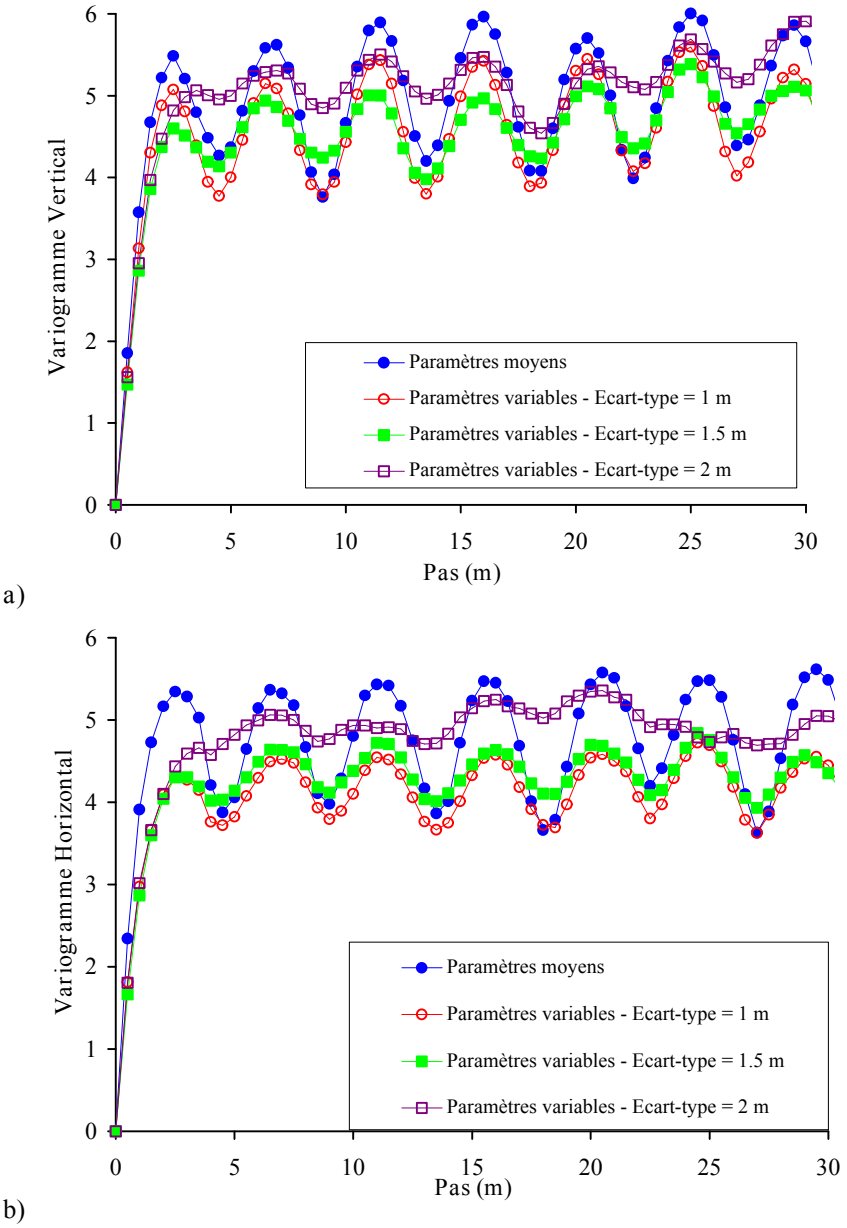


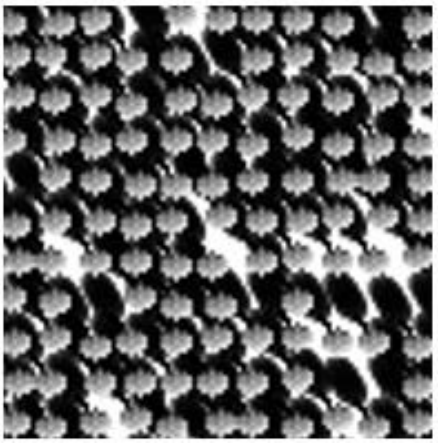
Figure 3-37:

Influence de la variation simultanée de paramètres structuraux (des couronnes, H des arbres). Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART.

IV.7. Influence de l'indice foliaire

L'influence du LAI a été évaluée à l'aide des simulations de la maquette de base avec un LAI entre 1 et 10 dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Plusieurs configurations d'illumination ont été considérées: rayonnement solaire direct seul (SKYL = 0%), rayonnements solaire direct et diffus atmosphérique (SKYL = 25% et 50%).

Le suivi des niveaux radiométriques du sous-bois éclairé ou à l'ombre et des houppiers a été étudié. La distribution spatiale de ces 3 éléments a été déterminée avec l'image (Fig. 3-38a) de LAI maximal (très fort contraste) simulée avec 1 itération (SKYL=0%). En effet, dans ce cas, le sous-bois éclairé et à l'ombre sont facilement identifiables car leurs réflectances ont respectivement des valeurs égales à la plus forte et à la plus faible réflectance de l'image ($R_{sol\ éclairé}$=6.94% et $R_{sol\ à\ l'ombre}$=0.00%). L'histogramme (Fig. 3-38b) nous a ainsi permis d'évaluer la proportion de surface au sol de chaque élément: 6.16% pour le sous-bois éclairé (CN=255), 44.38% pour le sous-bois à l'ombre (CN≤2) et 49.46% pour les houppiers (2<CN<255).

a) 

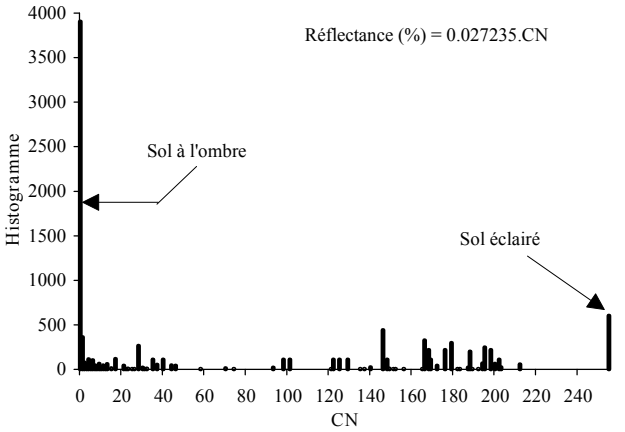
b) 

Figure 3-38: Évaluation du taux de couverture d'une a) image DART d'une plantation forestière de LAI = 10. b) Histogramme de l'image (SKYL = 0%).

IV.7.1. Simulations dans le visible

Les variations des réflectances des différentes surfaces joue un rôle majeur pour l'explication des variations des variogrammes avec l'augmentation du LAI. L'analyse des réflectances (Tableau 3-18) montre que:

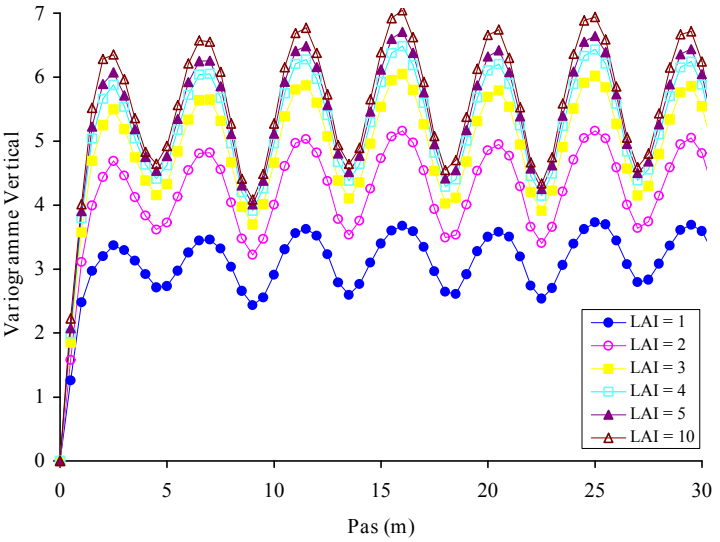
- Sous-bois éclairé: La réflectance diminue d'une manière générale avec l'augmentation du LAI. La faible décroissance ($7.53\% \rightarrow 7.43\%$) obtenue pour SKYL = 0% s'explique par le fait que l'augmentation du LAI entraîne une très légère diminution de rayonnement diffusé vers le bas par les couronnes. Cet effet est observé uniquement dans le cas où les diffusions multiples sont prises en compte. La réflectance diminue d'autant plus fortement que le SKYL est élevé. Ainsi, la réflectance passe de 6.21% à 5.65% pour SKYL = 25% et de 5.50% à 4.28% pour SKYL = 50%. Pour tout élément de sous-bois éclairé, la contribution du rayonnement solaire direct est constante quelque soit l'indice foliaire de la parcelle, alors que les contributions des rayonnements diffus et directs transmis et diffusés par les couronnes diminuent car les couronnes deviennent peu à peu opaques.
- Sous-bois à l'ombre: La réflectance diminue fortement avec l'augmentation de l'indice foliaire ; le rayonnement intercepté par les couronnes étant de plus en plus grand. Dans le cas où SKYL = 0%, la réflectance du sous-bois à l'ombre devient nulle si LAI ≥ 6 et si on considère une seul ordre de diffusion. De plus, la diminution de la réflectance du sous-bois à l'ombre avec un LAI croissant est moins importante pour des SKYL élevés. En effet, avec un SKYL = 0%, les mécanismes de diffusions multiples sont les seules sources d'illumination du sol à l'ombre alors que pour des SKYL ≠ 0%, le sol à l'ombre peut être directement éclairé par le rayonnement atmosphérique qui se propage d'une part entre les couronnes et d'autre part, à travers les couronnes sans interception.
- Couronne: La réflectance diminue avec l'augmentation du LAI. Pour de faibles LAI, cette réflectance est due à la diffusion du houppier et à la transmission à travers la couronne du rayonnement diffusé par le sous-bois. L'augmentation du LAI accroît la contribution associée à la diffusion par les éléments foliaires du houppier mais diminue dans des proportions plus élevées la contribution du sous-bois ce qui explique la diminution de la réflectance.

	Réfl $_{sol\ éclairé}$				Réfl $_{sol\ à\ l'ombre}$				Réfl $_{houppier}$				Réfl $_{totale}$			
SKYL	0%		25%	50%	0%		25%	50%	0%		25%	50%	0%		25%	50%
ITER.	1	2	2	3	1	2	2	3	1	2	2	3	1	2	2	3
LAI=1	6.95	7.53	6.21	5.50	2.31	2.56	2.60	3.04	4.98	5.45	5.40	5.75	4.11	4.48	4.28	4.52
LAI=2	6.94	7.49	5.97	4.91	0.77	0.91	1.16	1.62	4.70	5.15	5.15	5.58	3.20	3.51	3.40	3.61
LAI=3	6.94	7.47	5.87	4.63	0.26	0.34	0.65	1.08	4.53	4.93	4.98	5.43	2.75	3.01	2.96	3.16
LAI=4	6.94	7.45	5.78	4.52	0.09	0.14	0.45	0.86	4.43	4.80	4.88	5.38	2.50	2.73	2.71	2.94
LAI=5	6.94	-	5.74	4.44	0.03	-	0.37	0.71	4.38	-	4.82	5.35	2.36	2.56	2.56	2.65
LAI=7	6.94	-	5.72	4.34	0.00	-	0.25	0.66	4.34	-	4.76	5.31	2.20	2.42	2.37	2.62
LAI=8	6.94	-	5.68	4.32	0.00	-	0.13	0.64	4.34	-	4.74	5.31	2.13	2.29	2.31	2.59
LAI=10	6.94	7.43	5.65	4.28	0.00	0.02	0.11	0.61	4.33	4.57	4.71	5.30	2.08	2.22	2.29	2.57

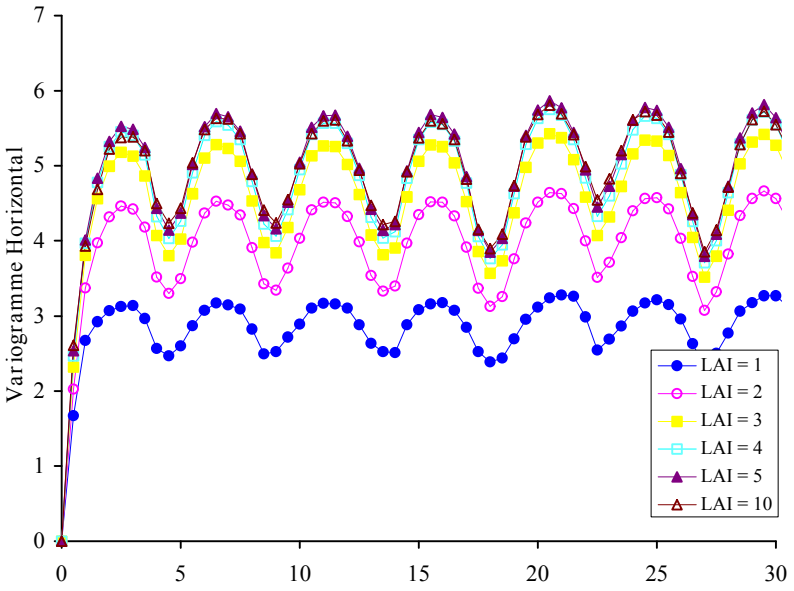
Tableau 3-18: Réflectances totale et moyennes (%) du sol éclairé ou à l'ombre et des houppiers dans le visible pour différentes itérations (ITER.). LAI de 1 à 10. SKYL = 0, 25 et 50%.

L'augmentation du LAI modifie les variogrammes. Les figures 3-39, 3-40 et 3-41 représentent les variogrammes associés à une plantation de LAI variable avec des SKYL de 0%, 25% et 50%. L'analyse des variogrammes permet de noter:

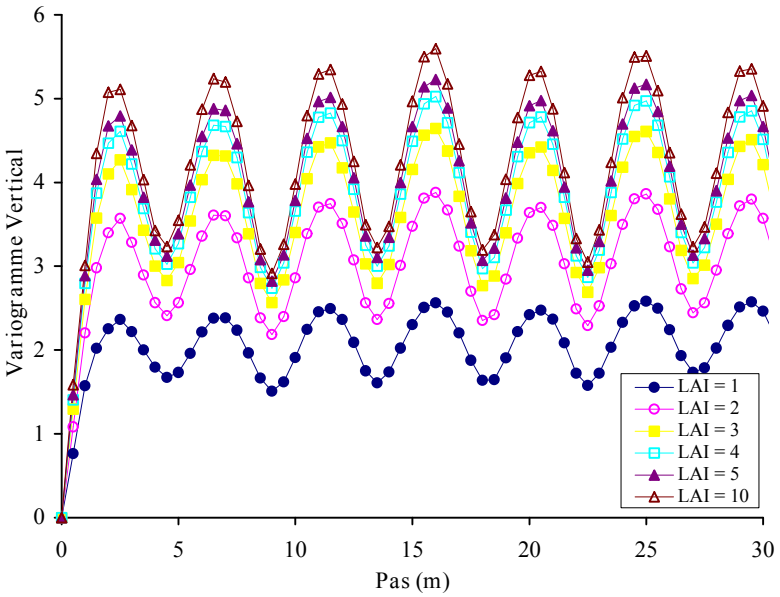
- une élévation du palier avec une saturation pour les forts LAI quelque soit le SKYL. Cette saturation survient pour LAI ≈ 4 avec le variogramme horizontal et LAI ≈ 5 pour le variogramme vertical. En effet, l'augmentation du LAI entraîne des contrastes de plus en plus forts entre les couronnes et le sous-bois. Toutefois, la différence relative entre les réflectances des surfaces claires et sombres saturent avec le LAI. La figure 3-44 illustre la variation du palier avec le LAI (SKYL de 0% à 50%). Les paliers les plus forts sont obtenus pour les plus faibles SKYL ; le rayonnement diffus atmosphérique a tendance à uniformiser la radiométrie en diminuant les contrastes.
- une augmentation et saturation de l'amplitude des oscillations pour les forts LAI car la différence de réflectance entre houppiers et sous-bois sature aussi (Tableau 3-18).
- des tendances contraires des portées: les portées des variogrammes verticaux diminuent avec le LAI croissant et augmentent pour les variogrammes horizontaux. Ce paramètre n'est pas ici significatif.



a)



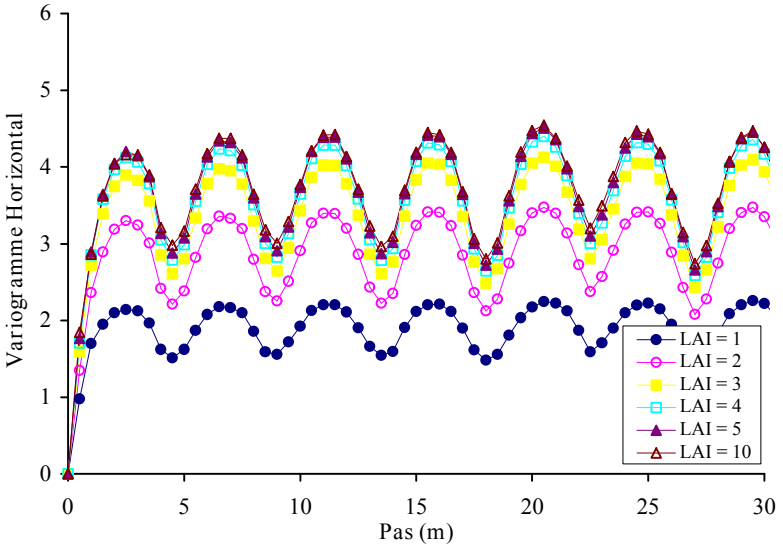
b)



a)

Figure 3-39:

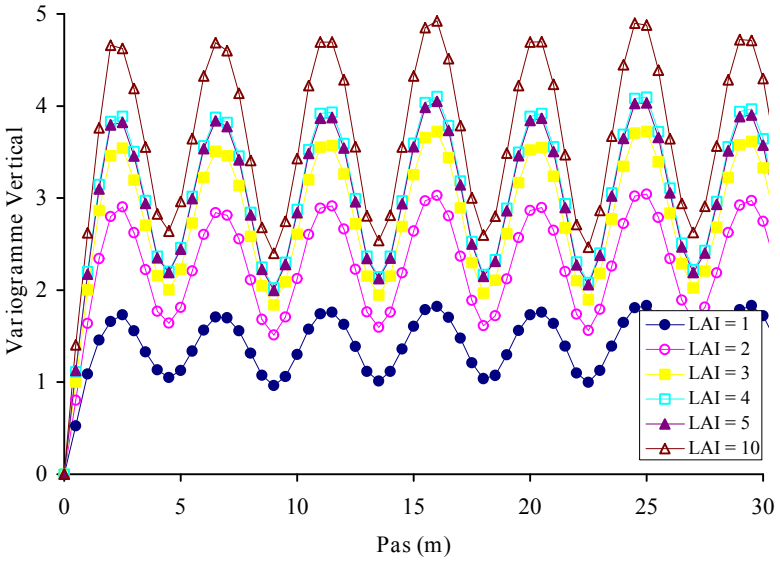
Influence du LAI d'une parcelle de pins. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART (SKYL= 0%).



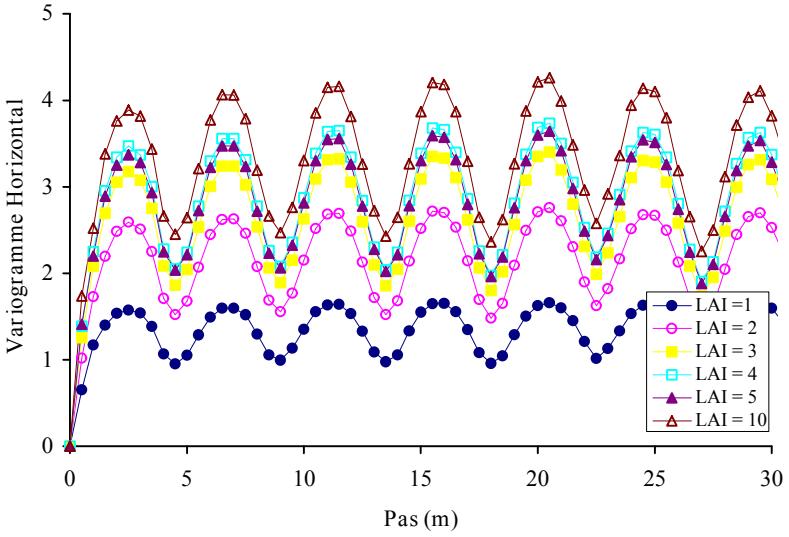
b)

Figure 3-40:

Influence du LAI d'une parcelle de pins. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART (SKYL= 25%).



a)



b)

Figure 3-41:

Influence du LAI d'une parcelle de pins. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART (SKYL= 50%).

	LAI	1		2		3		4		5		10	
	Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
SKYL=0%	V_o ou palier	3.41	2.88	4.38	3.99	4.99	4.63	5.28	4.89	5.43	4.99	5.59	4.98
	V_1 ou indicateur de portée	1.45	2.07	1.39	1.76	1.42	1.70	1.44	1.68	1.45	1.66	1.51	1.61
	Var	3.23		4.57		5.33		5.67		5.83		5.96	
SKYL=25%	V_o ou palier	2.27	1.91	3.16	2.87	3.70	3.39	3.96	3.61	4.09	3.70	4.28	3.75
	V_1 ou indicateur de portée	1.41	1.87	1.40	1.68	1.43	1.65	1.45	1.63	1.46	1.61	1.50	1.57
	Var	2.24		3.42		4.06		4.36		4.51		4.70	
SKYL=50%	V_o ou palier	1.55	1.34	2.39	2.16	2.88	2.64	3.15	2.89	3.17	2.94	3.73	3.33
	V_1 ou indicateur de portée	1.53	1.84	1.51	1.71	1.52	1.70	1.53	1.70	1.54	1.72	1.56	1.71
	Var	1.58		2.66		3.29		3.62		3.66		4.28	

Tableau 3-19: Variance des images DART. Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés. Simulations effectuées dans le visible avec un SKYL égal à 0%25% et 50%. LAI=1 à 10.

Une étude similaire a été menée en modifiant de manière aléatoire la position des arbres dans la maquette de base (Fig. 3-42). Il a été considéré un écart maximal de 10 m pour ce qui est du positionnement des arbres par rapport aux noeuds de la grille associée à la plantation. La maquette ainsi obtenue correspond à ce que l'on appellera une « forêt naturelle ». Les simulations ont été effectuées pour LAI de 1 à 10 et SKYL = 0%. Comme précédemment, l'augmentation du LAI rehausse le palier (Fig. 3-43). Par contre, les oscillations périodiques disparaissent car les arbres ne sont plus régulièrement distribués. On peut également noter que les paliers de la forêt naturelle sont plus forts que ceux de la plantation.

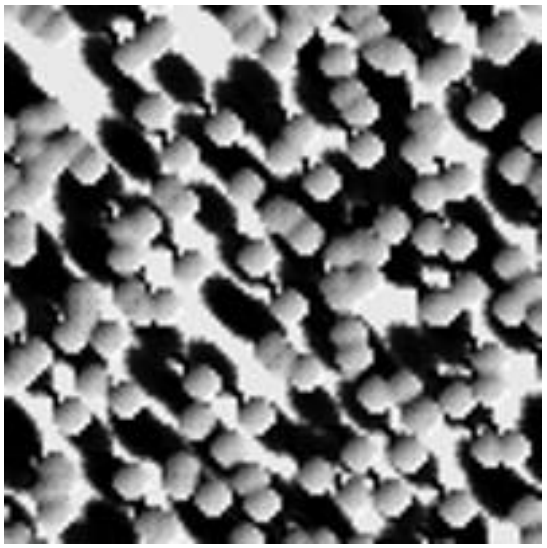


Figure 3-42: Simulation d'une « forêt naturelle » de LAI égal à 4 dans le domaine spectral du vert.

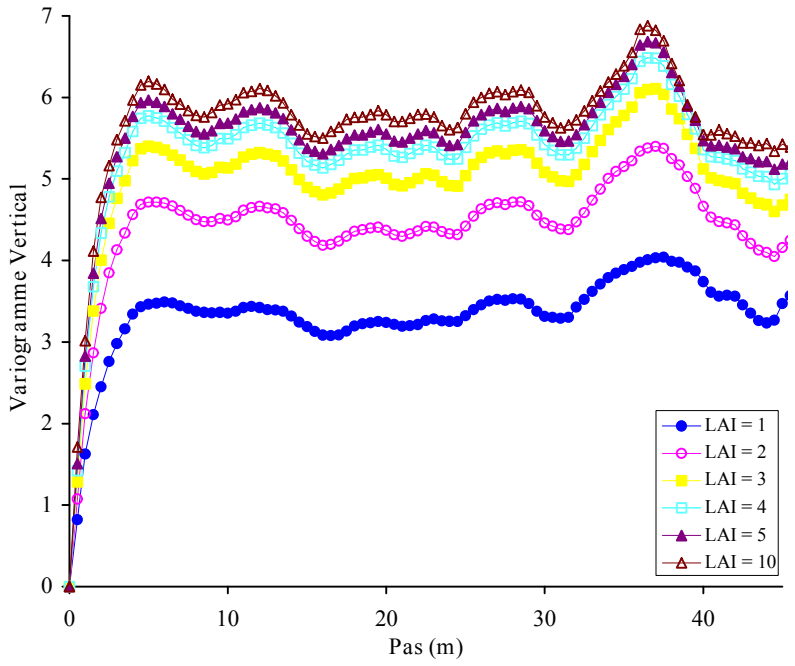


Figure 3-43:

Variabilité des variogrammes d'images DART d'une forêt naturelle de LAI variable. La position des arbres n'est pas régulière (Écart max. de 10 m).

En conclusion, l'information texturale « palier » est particulièrement sensible à l'indice foliaire pour les faibles LAI ([0 4]) et les faibles SKYL. Un phénomène de saturation survient pour les LAI supérieurs à 4. Des simulations réalisées avec une « forêt naturelle » ont montré que la désorganisation des rangées a une faible influence (Fig. 3-44) au niveau des paliers: ils sont légèrement plus élevés que dans le cas d'une plantation du fait d'une plus forte variabilité radiométrique. Les caractéristiques périodiques disparaissent toutefois dans ce cas.

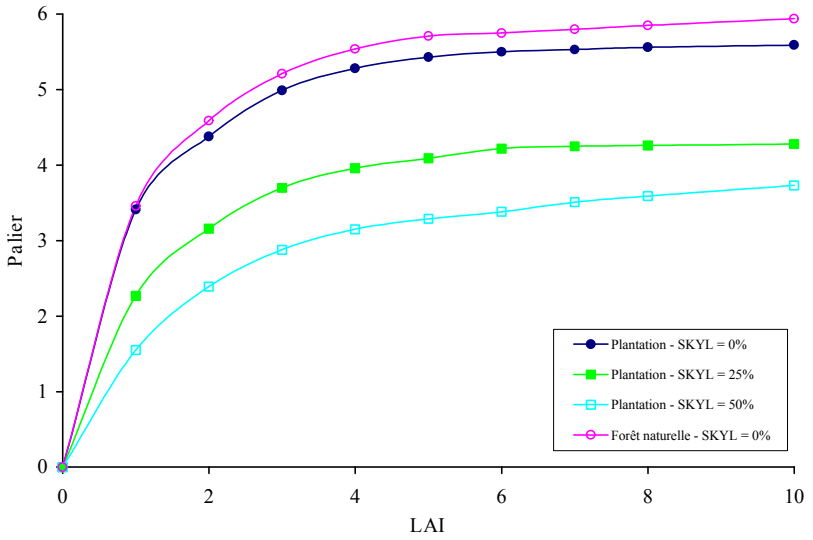


Figure 3-44:

Paliers des variogrammes pour différents LAI et SKYL.

IV.7.2. Simulations dans le proche infrarouge

Les simulations proche infrarouge de plantations avec un SKYL de 0% ou 25% et des LAI de 1 à 10 ont permis de constater des tendances similaires pour les réflectances visibles des différents éléments de la scène. Avec l'augmentation du LAI, on constate (Tableau 3-20):

- Sous-bois à l'ombre: une décroissance très rapide de la réflectance. La réflectance minimale n'est cependant pas nulle comme dans le visible puisque elle atteint 3.81% et 5.03% respectivement pour SKYL = 0% et 25%. La réflectance du sol à l'ombre est d'autant plus forte que le SKYL est élevé.
- Sous-bois éclairé: une diminution de la réflectance liée à une plus faible diffusion du rayonnement vers le bas par les houppiers ; la transmittance des houppiers étant de plus en plus réduite. Cette diminution est d'autant plus forte que le SKYL est grand.
- Couronne: une décroissance de la réflectance compte tenu de la diminution de la contribution du sol éclairé sous la couronne étant donné la réduction de la transmittance des houppiers avec l'augmentation de la densité foliaire.

	Réfl $_{sol\ éclairé}$		Réfl $_{sol\ à\ l'ombre}$		Réfl $_{houppier}$		Réfl $_{totale}$	
SKYL	0%	25%	0%	25%	0%	25%	0%	25%
LAI=1	32.67	28.78	17.35	17.97	40.32	42.00	27.16	27.67
LAI=2	33.79	29.05	12.89	13.82	43.69	46.00	26.30	27.22
LAI=3	33.51	28.44	10.13	11.38	42.81	45.61	24.45	25.72
LAI=4	32.83	27.84	8.32	9.74	41.01	44.06	22.67	24.13
LAI=5	32.14	26.84	7.01	8.51	39.14	42.22	21.13	22.66
LAI=6	31.52	26.12	6.01	7.49	37.57	40.51	19.88	21.36
LAI=7	30.99	25.48	5.24	6.67	36.30	39.00	18.88	20.25
LAI=8	30.56	24.85	4.65	6.01	34.98	37.45	17.97	19.24
LAI=9	30.19	24.43	4.18	5.41	33.85	35.95	17.23	18.38
LAI=10	29.89	24.12	3.81	5.03	32.80	34.77	16.57	17.58

Tableau 3-20: Réflectances totales et moyennes (%) du sol éclairé ou à l'ombre et des houppiers d'une parcelle forestière dans le proche infrarouge. SKYL = 0 et 25% et LAI = 1 à 10.

Alors que les variations des réflectances ont des tendances similaires dans le visible et le proche infrarouge, le comportement des variogrammes (Fig. 3-47) diffère quelque peu en particulier au niveau de l'évolution des paliers. On constate que:

- les variogrammes proche infrarouge présentent des formes similaires (période, amplitude des oscillations) quelque soit le SKYL.
- les portées des variogrammes horizontaux sont bien corrélées avec le LAI (Fig. 3-45): $R_{SKYL=O\%} = 97.4\% \pm 2.4\%$ et $R_{SKYL=25\%} = 98.2\% \pm 1.6\%$ (intervalle de confiance du coefficient de corrélation R à 90%). Cependant, la dynamique de la portée est très faible (variation entre 0.615 et 0.655) comparativement à la variation de la portée dans le cas de la modification du diamètre des couronnes des arbres (variation entre 0.26 et 0.9). Les relations obtenues avec les variogrammes verticaux sont plus imprécises.

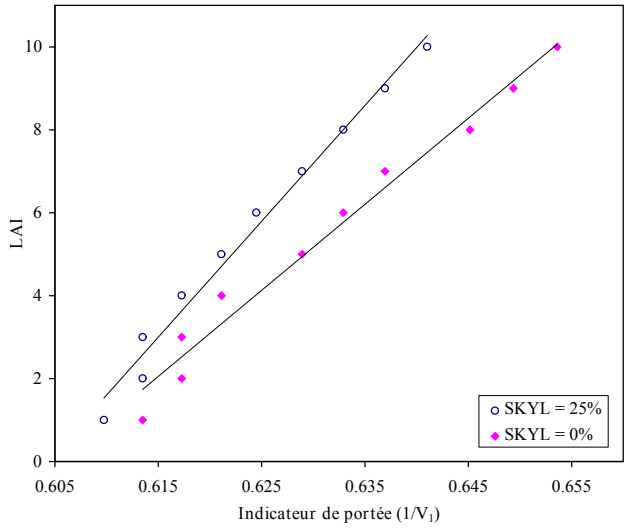


Figure 3-45:

Relation entre la portée ($1/V_1$) dérivée des variogrammes horizontaux et le LAI. Simulations dans le proche infrarouge avec un SKYL de 0 et 25%.

- les paliers des variogrammes des scènes de LAI entre 2 et 10 sont très proches quelque soit le SKYL. Seul le palier des variogrammes correspondant aux images de LAI=1 est beaucoup plus bas que les autres. En première approximation, nous pouvons considérer que les surfaces les plus représentées sont le sol à l'ombre (44.38%) et les houppiers (49.46%). La différence de réflectance (Tableau 3-21) entre ces deux éléments varie entre $\Delta R_{SKYL=0\%}$=29% ($\Delta R_{SKYL=25\%}$=32.2%) et $\Delta R_{SKYL=0\%}$=32.6% ($\Delta R_{SKYL=25\%}$=29.7%) pour des LAI compris entre 2 et 10 alors qu'elle est égale à environ $\Delta R_{SKYL=0\%}$=23% ($\Delta R_{SKYL=25\%}$=24%) pour un LAI de 1. Cette différence beaucoup plus faible explique que le palier des variogrammes de la parcelle de LAI égal à 1 est plus bas que les autres.
- les paliers n'augmentent pas de manière monotone avec le LAI comme dans le visible (Fig. 3-46). Ils augmentent pour des LAI de 1 et 4 puis diminuent pour des LAI supérieurs à 5 quelque soit le SKYL. En effet, la différence de réflectance entre les houppiers et le sol à l'ombre augmente pour des LAI de 1 à 4 et diminue pour des LAI supérieurs à 5. Des résultats similaires ont été obtenus dans le cas de la forêt naturelle (Fig. 3-46).

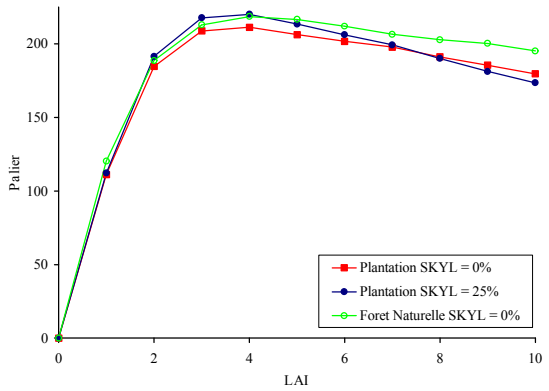
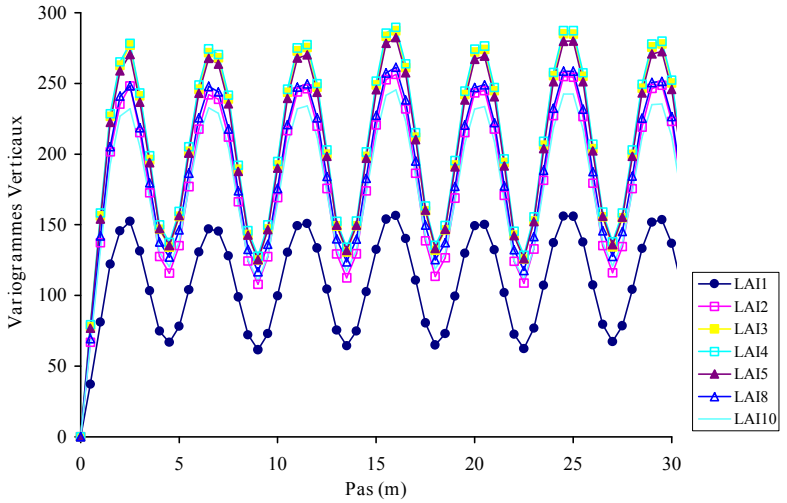


Figure 3-46:

Paliers des variogrammes pour différents LAI et SKYL.

- De plus, la remarque faite dans le visible, selon laquelle le rayonnement atmosphérique diffus à tendance à homogénéiser la radiométrie des images n'est plus conservée dans le proche infrarouge. Les paliers des variogrammes sont très proches de ceux correspondant à une illumination solaire seule. L'influence de l'atmosphère est donc beaucoup moins importante dans le proche infrarouge.

a)



b)

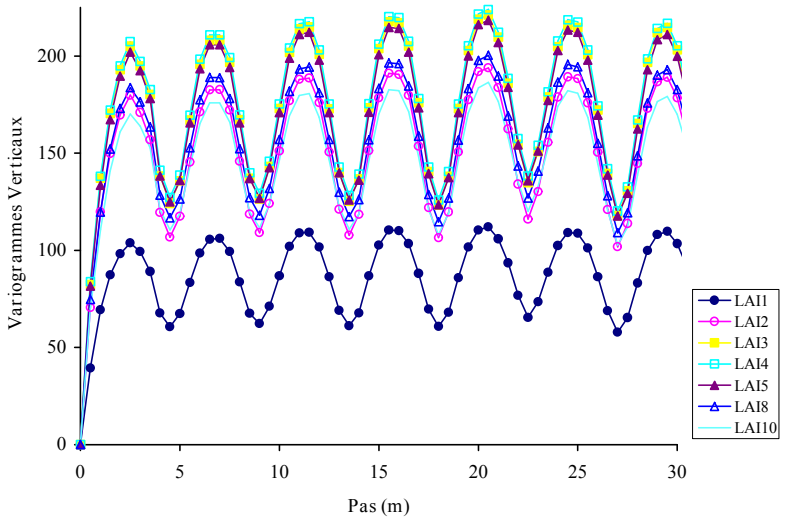


Figure 3-47:

Influence du LAI d'une parcelle de pins dans le proche infrarouge.

Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART. SKYL=0%.

	LAI	1		2		3		4		5		10	
	Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
SKYL=0%	V_o ou palier	111.1	88.7	184.5	154.3	208.7	176.7	211.3	179.2	206.2	174.8	179.6	150.1
	V_1 ou indicateur de portée	1.65	1.63	1.67	1.32	1.68	1.62	1.67	1.61	1.66	1.59	1.63	1.53
	Var	127.5		215.9		244.3		246.8		240.5		206.8	
SKYL=25%	V_o ou palier	112.2	91.2	191.4	161.5	217.7	185.3	220.1	187.6	213.5	182.0	173.5	146.6
	V_1 ou indicateur de portée	1.73	1.64	1.77	1.63	1.73	1.63	1.72	1.62	1.72	1.61	1.68	1.56
	Var	130.3		225.8		256.8		259.3		251.3		202.4	

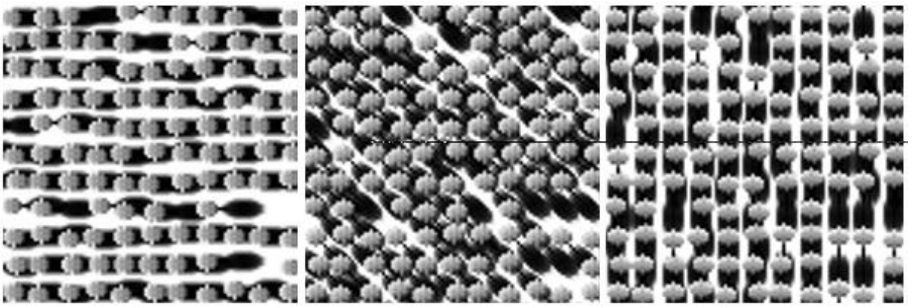
Tableau 3-21: Variance des images DART. Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés. Simulations dans le proche infrarouge effectuées avec un SKYL égal à 0% et 25%.

V. INFLUENCE DES CONFIGURATIONS ANGULAIRES

Outre les variations des paramètres biophysiques de la canopée, les configurations géométriques d'illumination et de visée peuvent également influencer la texture des images car elles modifient les proportions et la réflectance des surfaces éclairées ou à l'ombre. Il est donc important d'évaluer si les variations induites par un paramètre structural du couvert et observées au niveau des variogrammes restent perceptibles pour une autre configuration géométrique d'illumination ou d'observation.

Toutes les configurations possibles n'ont pas été analysées dans cette étude. Nous avons uniquement considéré la scène de base dans le visible avec un SKYL nul et trois configurations solaires (θ_s=148.8° avec ϕ_s=0°, 45° et 90°), l'ensemble des configurations de visée étant automatiquement fourni avec le modèle DART.

V.1. Influence de l'angle azimutal solaire (= Influence orientation des rangées)



a) b) c)

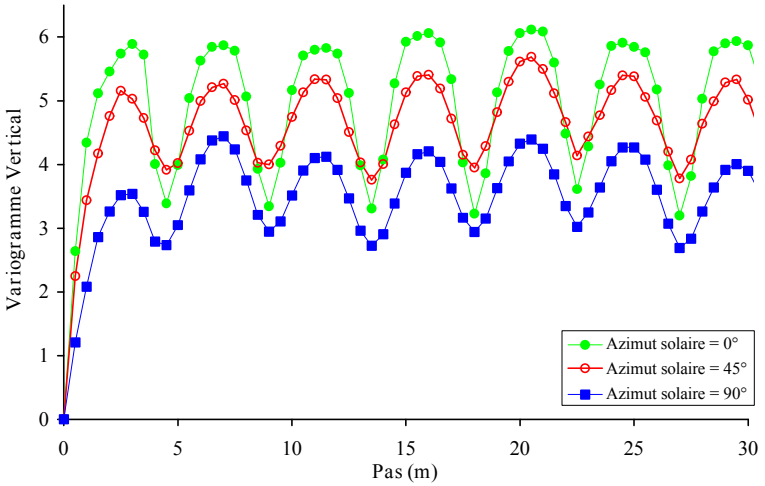
Figure 3-48: Simulations DART d'une plantation de pins pour 3 directions d'éclairement $_s$=148.8°, (a) $_s$=90°, (b) $_s$=45° et (c) $_s$=0°.

Les variogrammes verticaux et horizontaux (Fig. 3-49) montrent que:

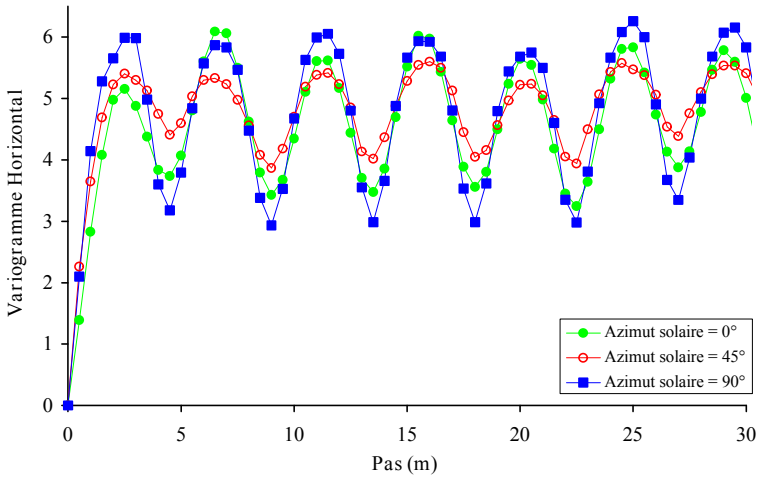
- la période des variogrammes donne la dimension inter-rang.
- les paliers et les amplitudes des oscillations sont maximaux pour les variogrammes de direction parallèle à la configuration solaire (Tableau 3-23): variogramme horizontal si $\phi_s = 90°$, variogramme vertical si $\phi_s = 0°$. Ces deux variogrammes seraient identiques si les pas verticaux et horizontaux de la grille de distribution des arbres étaient égaux. La répartition des arbres serait alors la même dans les deux cas et les réflectances seraient identiques (Tableau 3-22).

soleil	90°	45°	0°
Réfl $_{sol\ éclairé}$	6.67	6.67	6.67
Réfl $_{sol\ à\ l'ombre}$	0.22	0.31	0.46
Réfl $_{houppier}$	4.17	4.18	4.59
Réfl $_{totale}$	4.00	3.21	3.51

Tableau 3-22: Réflectance moyenne (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers d'une parcelle simulée dans le visible pour LAI=2.92 et pour 3 angles azimutaux solaires (90°, 45°, 0°). Le sol est supposé lambertien.



a)



b)

Figure 3-49:

Influence de la configuration d'illumination: $_s$=148.8° ; $_s$ = 90°, 45°, 0°.

Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux d'images DART

soleil	90°		45°		0°	
Variogramme	V	H	V	H	V	H
V_0 ou palier	3.68	4.94	4.77	4.86	5.10	4.68
V_1 ou indicateur de portée	0.86	1.83	1.39	1.52	1.85	1.14
Variance	4.10		4.20		4.34	

Tableau 3-23: Variance d'images DART (LAI=2.92). Paliers et portées des variogrammes verticaux (V) et horizontaux (H) associés.

V.2. Influence de l'angle zénithal de visée

Tout comme la configuration géométrique d'illumination, la configuration d'observation est un paramètre susceptible d'influencer de manière importante l'information texturale d'une image. L'étude de ce facteur s'appuie sur l'analyse de variogrammes calculés à partir d'une parcelle simulée dans le visible pour différentes configurations zénithales d'observation.

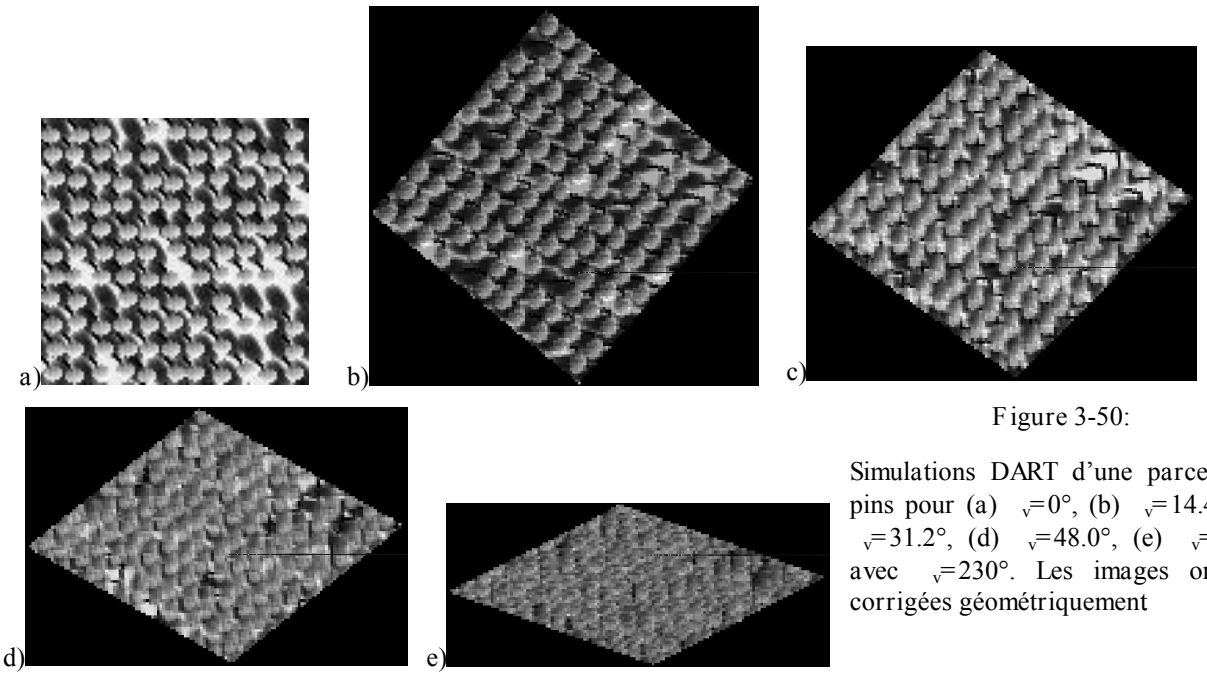


Figure 3-50:

Simulations DART d'une parcelle de pins pour (a) $_v$=0°, (b) $_v$=14.4°, (c) $_v$=31.2°, (d) $_v$=48.0°, (e) $_v$=64.8° avec $_v$=230°. Les images ont été corrigées géométriquement

De par la nature du modèle DART, une seule simulation donne plusieurs images directionnelles. Nous avons limité l'analyse aux images simulées dans un même plan azimutal (ϕ_v=230°) d'observation mais pour plusieurs configurations zénithales de visée. Des corrections géométriques ont été appliquées à chaque image (Fig. 3-50). En effet, de manière à correspondre aux images « vues » par un capteur au dessus de la forêt, les simulations DART doivent être projetées sur un plan perpendiculaire à la direction d'observation. Une scène rectangulaire est donc transformée en losange dont la taille dépend de la direction de visée.

Les variogrammes ont été calculés en considérant la direction parallèle aux rangées des images corrigées géométriquement. Cette direction correspond à différent angles azimutaux ϕ_{variog} selon la direction d'observation. Ainsi, ϕ_{variog}=90° pour une direction au nadir et ϕ_{variog}=125.9° pour θ_v=31.2° et ϕ_v=230°.

Les variogrammes (Fig. 3-51) indiquent que:

- la période des oscillations diminue lorsque l'angle zénithal de visée augmente, car les distances apparentes entre les rangées d'arbres diminuent.
- le palier des variogrammes (Tableau 3-24) diminue avec l'augmentation de l'angle zénithal de visée comme la variance des images. En effet, plus la direction d'observation est inclinée, plus le couvert paraît homogène: la variance diminue.
- l'amplitude des oscillations diminue également avec l'augmentation de l'angle zénithal de visée, car le couvert paraît de plus en plus homogène. Le sol n'est presque plus perceptible.

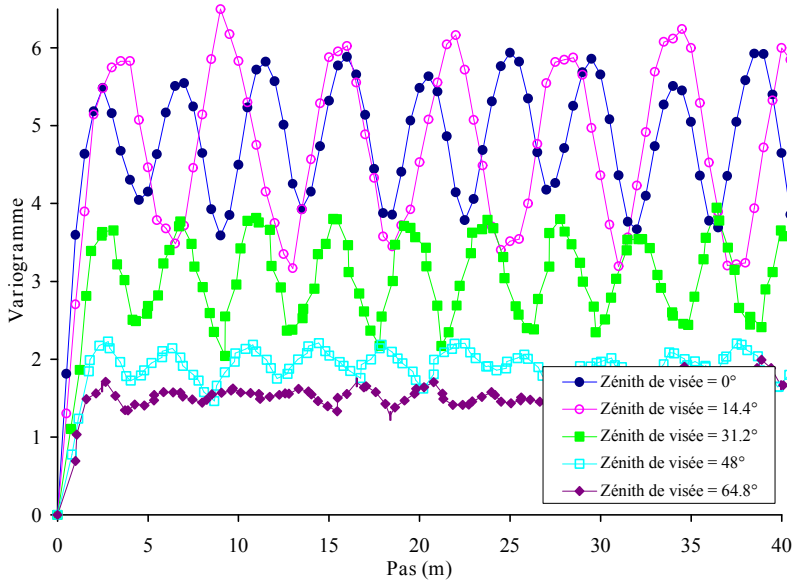


Figure 3-51:

Influence de la configuration géométrique d'observation ($_v$=0°, $_v$=14.4°, $_v$=31.2°, $_v$=48.0° et $_v$=64.8° avec $_v$=230°) d'une parcelle (LAI=2.92). Variogrammes d'images DART de direction parallèle aux rangées verticales d'arbres.

observation	0°	14.4°	31.2°	48°	64.8°
V_0 ou palier	4.84	4.66	3.00	1.93	1.54
V_1 ou indicateur de portée	1.70	1.65	1.46	1.41	1.44
Variance	5.42	5.81	3.84	2.38	2.20

Tableau 3-24: Variance de simulations DART observées à 0°, 14.4°, 31.2°, 48° et 64.8° avec un angle azimutal de 230°. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes associés (LAI=2.92).

Le tableau 3-25 indique les variations de la réflectance du sol éclairé ou à l'ombre, des houppiers et de la scène totale avec l'angle zénithal de visée. Il apparaît que la réflectance du sol augmente notablement. Cette augmentation provient du caractère directionnel du sol, c'est à dire « sol nu + herbe ». Par contre, la réflectance des houppiers est beaucoup plus isotrope.

observation	0°	14.4°	31.2°	48°
Réfl $_{sol\ éclairé}$	6.94	7.04	7.47	9.30
Réfl $_{sol\ à\ l'ombre}$	0.04	0.04	0.04	0.05
Réfl $_{houppier}$	4.37	4.61	4.32	4.81
Réfl $_{moyenne}$	3.96	3.93	4.12	4.45

Tableau 3-25:

Réflectances totales et moyennes du sol éclairé ou à l'ombre et des houppiers d'une parcelle de LAI=2.92.

VI. INFLUENCE DE LA RESOLUTION SPATIALE

Les études précédentes ont montré que les caractéristiques texturales d'une image apportent une information sur la structure de la canopée. Compte tenu des résolutions spatiales des capteurs existants (SPOT XS: 20 m, SPOT P: 10 m, Landsat TM: 30 m, etc.), il est intéressant de connaître l'évolution de la texture avec la résolution des capteurs.

Guyon et al. (1994) ont déjà étudié ce problème de manière empirique dans le cas de la forêt des Landes. Leur but était de rechercher la résolution spatiale optimale qui permette d'utiliser l'information texturale pour caractériser la structure de plantations. Ils ont comparé les variogrammes d'images de télédétection acquises dans le visible et le proche infrarouge à des résolutions variant de 1.67m à 20 m. Leurs résultats ont montré que seul le palier présente

de l'intérêt pour la prédiction des paramètres de structure tant que la résolution du capteur ne dépasse pas 5 m dans le visible et 10 m dans le proche infrarouge. Dans ce cas, les régressions entre le palier et l'espacement moyen entre arbres présentent les plus fortes corrélations comparées aux autres paramètres de structure en particulier, la hauteur des arbres (Guyon et Riom, 1996). La principale tendance observée montre que la hauteur du palier diminue avec une dégradation de la résolution spatiale. La portée est difficilement estimable.

VI.1. Simulations dans le visible

L'étude présentée ci-dessous s'appuie sur l'analyse de variogrammes d'images DART simulées dans le visible à différentes résolutions spatiales entre 0.5 m et 3 m. Les images de résolution spatiale égale à 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m et 3 m ont été obtenues par moyennage de la simulation pleine résolution (50 cm) à l'aide de fenêtres de dimensions 2x2, 3x3, ... et 6x6 (Fig. 3-52). Une simulation a aussi été réalisée avec une maquette de forêt créée avec un échantillonnage spatial de 1.5 m (Fig. 3-53a). Cette simulation ainsi que celle obtenue à la résolution de 0.5 m sont dites « pleine résolution ». La résolution spatiale de 1.5 m a été choisie dans un but de comparaison avec les données « RAMI » réchantillonnées à 1.67m.

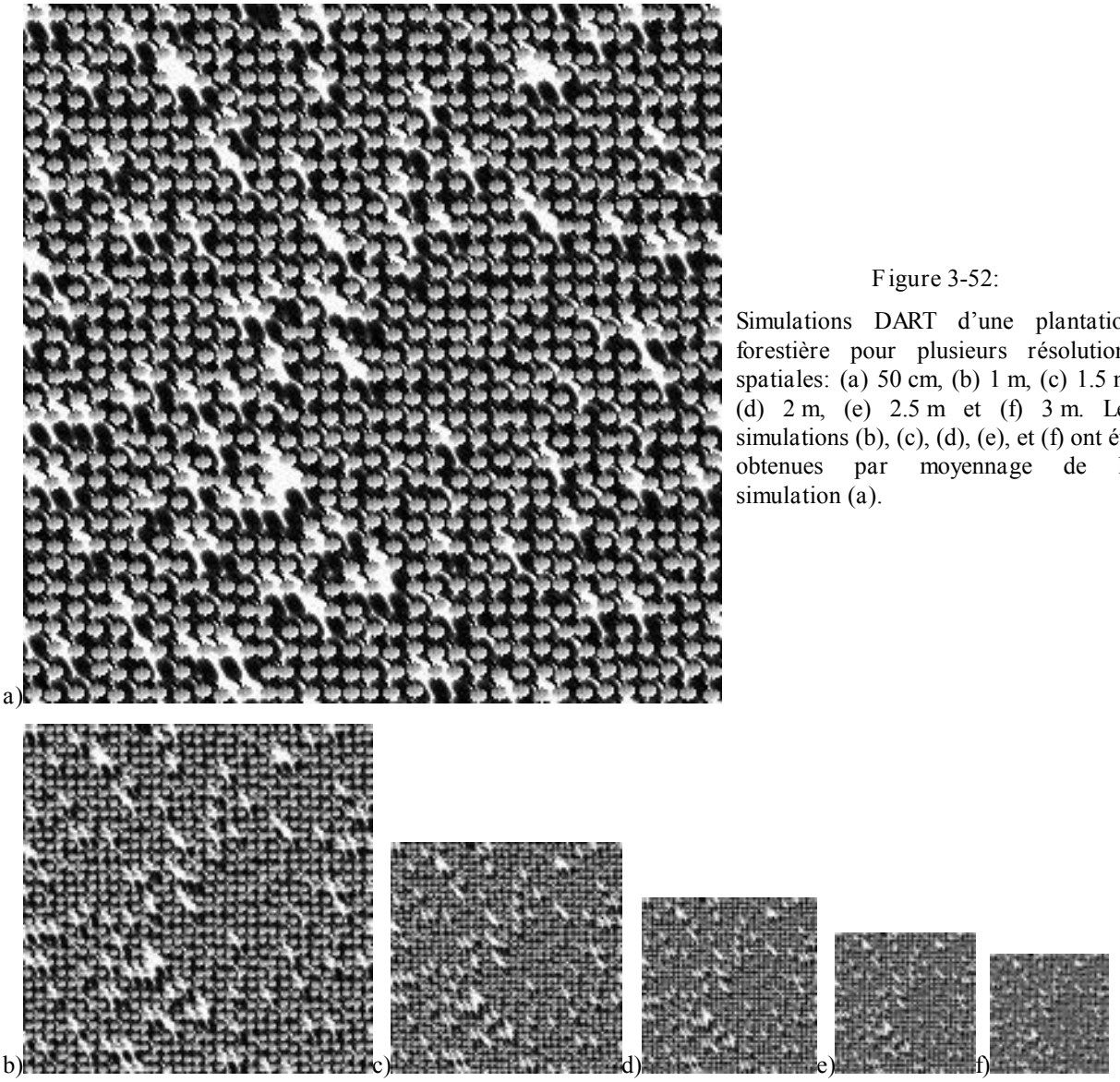


Figure 3-52:

Simulations DART d'une plantation forestière pour plusieurs résolutions spatiales: (a) 50 cm, (b) 1 m, (c) 1.5 m, (d) 2 m, (e) 2.5 m et (f) 3 m. Les simulations (b), (c), (d), (e), et (f) ont été obtenues par moyennage de la simulation (a).

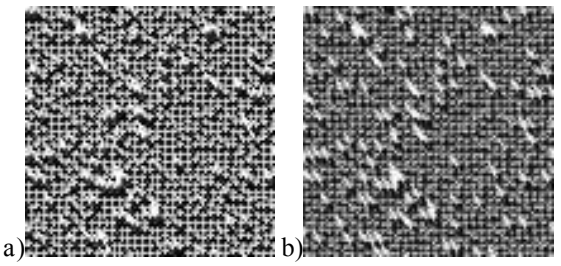
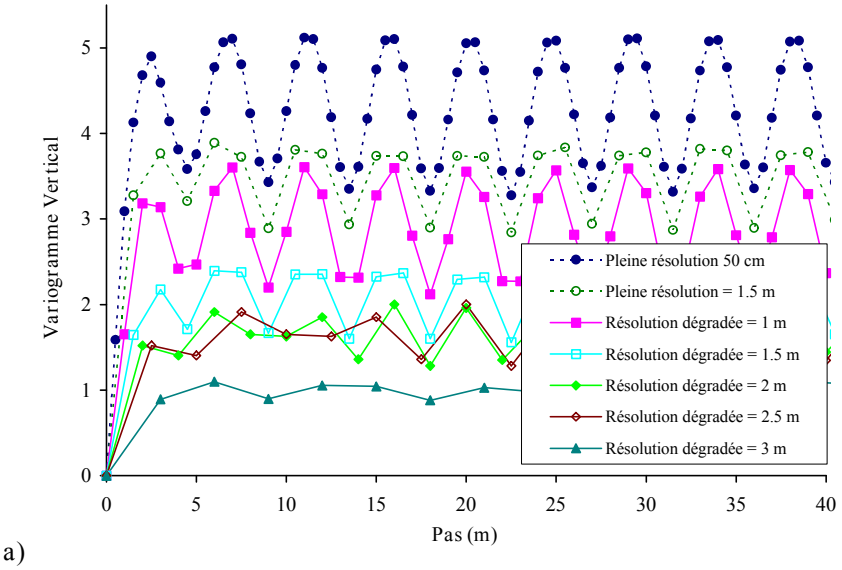


Figure 3-53:

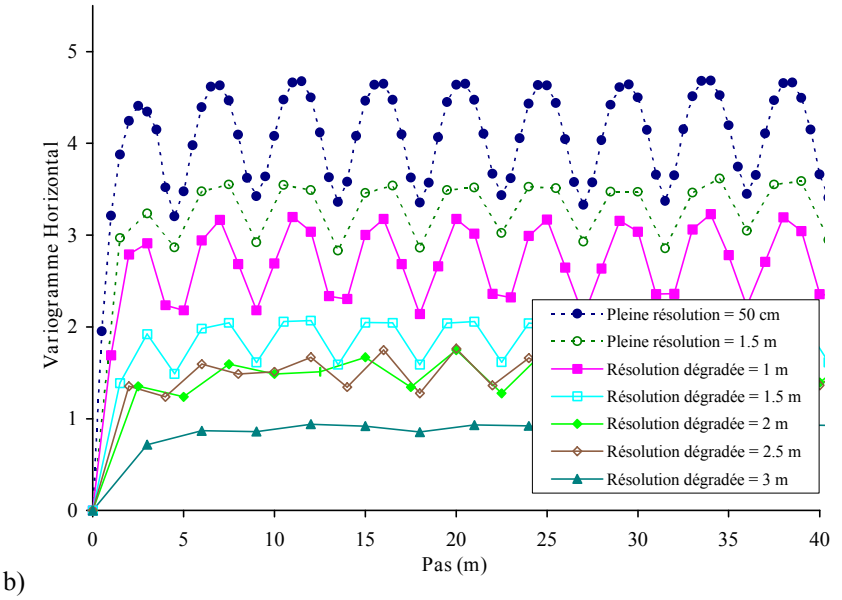
Simulations DART de résolution 1.5 m obtenues avec (a) une maquette de 1.5 m de résolution et (b) par moyennage d'une simulation de résolution 0.5 m (Fig. 3-52a).

L'analyse des variogrammes (Fig. 3-54) des images obtenues par moyennage de l'image simulée à 0.5 m de résolution nous permet d'observer que:

- les oscillations périodiques liées aux rangées d'arbres restent perceptibles jusqu'à la résolution 2 m / 2.5 m. En effet, tant que la fenêtre de moyennage a des dimensions inférieures à la taille des couronnes ou à l'espace entre les arbres, le moyennage est essentiellement effectué sur des pixels de même nature, ce qui permet de retrouver la périodicité des rangées. Dès que la taille de cette fenêtre est supérieure aux éléments de la parcelle (houppier, inter-rang), les pixels « résultat » du moyennage proviennent de pixels de nature différente ce qui induit une perte d'information ; le motif textural périodique lié à l'alternance «couronne - sous-bois » disparaît.
- le palier diminue fortement avec la résolution spatiale (Tableau 3-27). En effet, la variance de l'image diminue du fait du moyennage. La radiométrie de l'image devient plus homogène avec la disparition de pixels « purs » de type couronne ou ombre.
- l'amplitude des oscillations diminue avec l'homogénéisation radiométrique de l'image. Cette tendance est clairement vérifiée avec le tableau 3-26 qui présente l'évolution de la réflectance des différents éléments de la scène. En effet, lorsque la résolution passe de 50 cm à 1.5 m, la réflectance du sol éclairé diminue de 7.5% à 5.83%, celle du sol à l'ombre augmente de 0.08% à 1.35% et celle des couronnes diminue de 5.18% à 3.51%. Les contrastes locaux sont alors fortement lissés.
- la portée augmente avec la résolution spatiale (Fig. 3-55). Les corrélations obtenues sont égales à $R = 87.1\% \pm 12.6\%$ dans le cas des variogrammes verticaux et à $R = 86.4\% \pm 13.3\%$ dans le cas des variogrammes horizontaux pour des intervalles de confiance à 90%. Cette tendance s'explique par la disposition spatiale et les différences radiométriques des éléments de la scène. Dans le visible, le moyennage conduit à des images comprenant essentiellement 2 classes. Ces dernières ont des teintes relativement uniformes et sont principalement associées au sol éclairé et aux couronnes. Cette simplification de l'image s'explique par le fait que l'autre élément moyen du paysage, c'est à dire les ombres, présente une forme très découpée juxtaposée au sol éclairé et aux couronnes. Le moyennage fait donc disparaître les ombres, ce qui induit une augmentation de la taille des couronnes et des zones de sol éclairé et par suite, une augmentation de la portée. A une résolution de 3 m, il ne subsiste plus qu'une surface homogène, essentiellement associée aux couronnes, parsemée de quelques zones claires de sol éclairé. Les couronnes et rangées d'arbres ont une très nette influence sur les variogrammes jusqu'à une résolution de 2m. Les variogrammes présentent en effet des oscillations caractéristiques. Au delà de 2 m, elles ne peuvent plus être distinguées individuellement. La portée devient alors sensible à la dimension de ces zones de sol éclairé. L'augmentation de ces zones avec la dégradation de la résolution spatiale dépend de la forme, la compacité et la radiométrie des objets en présence.



a)



b)

Figure 3-54:

Influence de la résolution spatiale dans le visible. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART d'une plantation pour diverses résolutions (50cm, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m et 3m). Les courbes en trait plein se rapportent aux images obtenues par moyennage de la simulation pleine résolution (50cm) alors que les courbes en trait pointillé correspondent aux simulations pleine résolution.

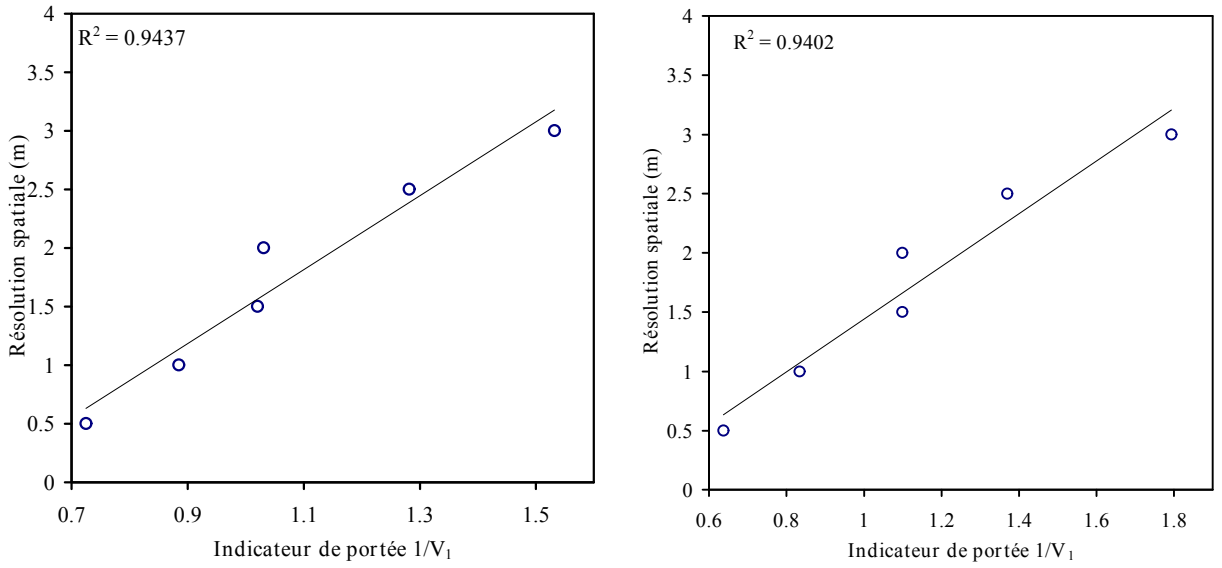


Figure 3-55: Relations entre la portée calculée à partir des variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART d'une plantation forestière pour plusieurs résolutions spatiales.

Nous avons aussi comparé l'information texturale de la simulation « pleine résolution 1.5 m » à l'image simulée à 1.5 m de résolution résultant du moyennage de l'image simulée à 0.5 m de résolution(Fig. 3-53):

- les paliers ont des valeurs très différentes. La variance de l'image simulée avec une maquette « pleine résolution » de 1.5 m est plus élevée car en l'absence de moyennage l'image est plus contrastée (Tableau 3-26 et 3-27). En effet, l'image « pleine résolution » contient des pixels « purs » (1 type d'élément) alors que l'image « dégradée ou moyennée » est composée principalement de pixels « mixtes ». Les différences de réflectance sont plus faibles dans le cas de l'image moyennée.
- les oscillations des 2 maquettes ont des amplitudes proches malgré l'effet du moyennage.
- l'indicateur de portée $1/V_1$ de l'image « pleine résolution 1.5 m » est plus faible que celui de l'image « moyennée ». Celle-ci est sans doute expliquée par la plus petite taille des couronnes avec un échantillonnage spatial à 1.5 m en « pleine résolution ».

	0.5m*	1.5m*	1.5m
Réfl $_{\text{sol éclairé}}$	7.50	7.50	5.83
Réfl $_{\text{sol à l'ombre}}$	0.08	0.62	1.35
Réfl $_{\text{houppier}}$	5.18	4.46	3.51

Tableau 3-26: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des simulations DART « pleine résolution » 0.5 m* et 1.5 m* et de résolution 1.5 m obtenue par moyennage de la simulation de résolution 0.5m*.

On constate également que les deux images « pleine résolution » (0.5 m et 1.5 m) ont des paliers toujours plus élevés que ceux des images obtenues par moyennage. L'image « pleine résolution » de 0.5 m présente le palier et les oscillations les plus élevés du fait des plus grandes différences de réflectance entre les zones sombres et claires (Tableau 3-26 et 3-27). Les deux images ont toutefois des moyennes très proches. Ce résultat permet de mettre en évidence le fait que la variance des images simulées est plus sensible que la moyenne à la taille de la maille d'échantillonnage utilisée lors de la création de maquettes.

Résolution	0.5 m*		1.5 m*		1 m		1.5 m		2 m		2.5 m	
Variogramme	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
V_0 ou palier	4.33	4.10	3.50	3.31	2.84	2.72	2.22	2.01	1.71	1.52	1.33	1.16
V_1 ou indicateur de portée	1.39	1.69	2.20	2.08	1.14	1.23	1.06	1.08	0.97	0.99	1.04	0.76
Variance	4.68		3.83		3.22		2.26		1.80		1.36	
Moyenne	2.58%		2.69%		2.58%		2.58%		2.58%		2.58%	

Tableau 3-27: Variance et réflectance moyenne d'images DART « pleine résolution » (*) et dégradées par moyennage de l'image « pleine résolution » à 0.5 m. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes verticaux et horizontaux associés.

VI.2. Simulations dans le proche infrarouge

Une étude similaire au visible a été conduite dans le proche infrarouge. Les tendances observées au niveau des variogrammes (Fig. 3-58) sont semblables, excepté pour l'indicateur de portée ($1/V_1$) pour lequel on ne peut dégager de relation très marquée:

- les oscillations périodiques restent perceptibles jusqu'à une résolution de 2.5 m.
- le palier et la variance (Tableau 3-28) diminue fortement avec la résolution spatiale.

- l'amplitude des oscillations diminue également avec la dégradation de la résolution spatiale mais reste plus élevée que dans le visible.

Tout comme dans le visible, on constate que les variogrammes associés à l'image « pleine résolution 1.5 m » et l'image à 1.5 m résultant du moyennage de l'image « pleine résolution 50 cm», ont des paliers très différents et des oscillations d'amplitudes proches.

Résolution	0.5 m*		1 m		1.5 m		2 m		2.5 m		1.5 m*	
Variog.	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
V_0 ou palier	207.8	177.2	149.5	120.2	111.3	83.1	87.4	69.1	68.2	52.9	173.2	166.6
V_1 ou indicateur de portée	1.67	1.54	1.59	1.22	4.91	1.17	5.51	3.69	4.43	3.28	1.68	1.62
Variance	237.6		172.9		121.2		98.6		71.7		195.7	
Moyenne	24.5%		24.5%		24.5%		24.5%		24.5%		25.2%	

Tableau 3-28: Variance et réflectance moyenne d'images DART « pleine résolution » (*) et dégradées par moyennage de l'image « pleine résolution » à 0.5 m. Paliers et indicateurs de portée des variogrammes verticaux et horizontaux associés.

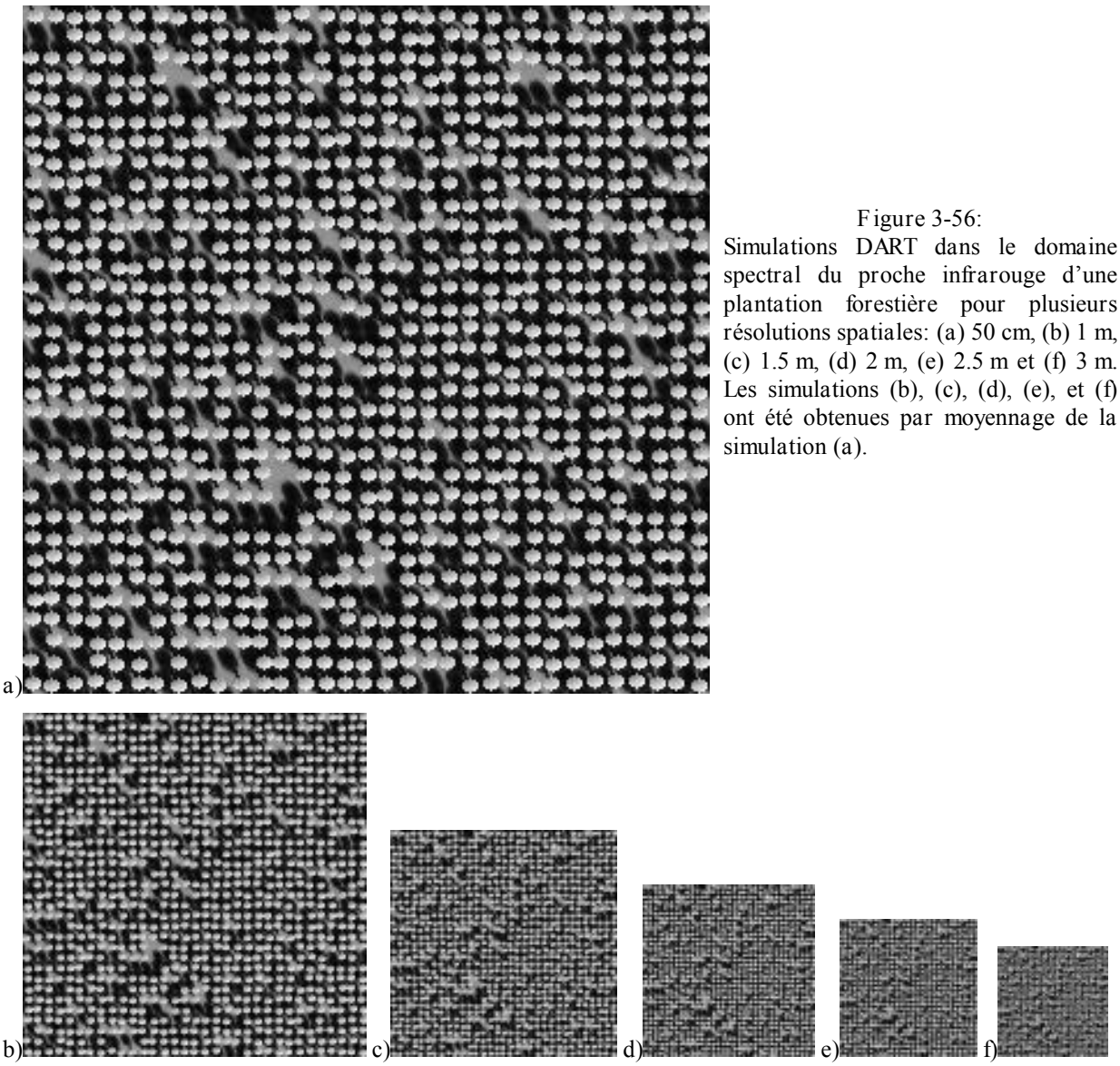
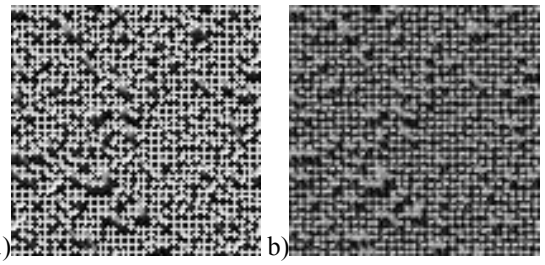


Figure 3-56:
Simulations DART dans le domaine spectral du proche infrarouge d'une plantation forestière pour plusieurs résolutions spatiales: (a) 50 cm, (b) 1 m, (c) 1.5 m, (d) 2 m, (e) 2.5 m et (f) 3 m. Les simulations (b), (c), (d), (e), et (f) ont été obtenues par moyennage de la simulation (a).

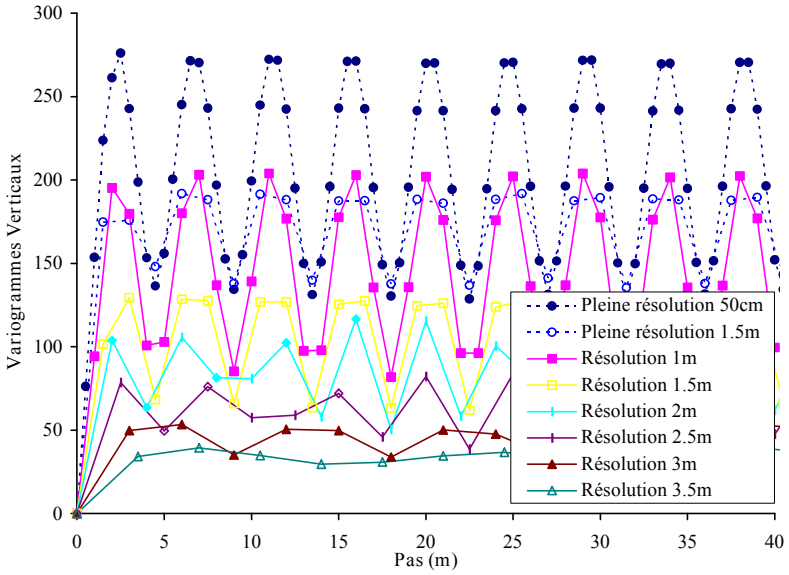


a) b)

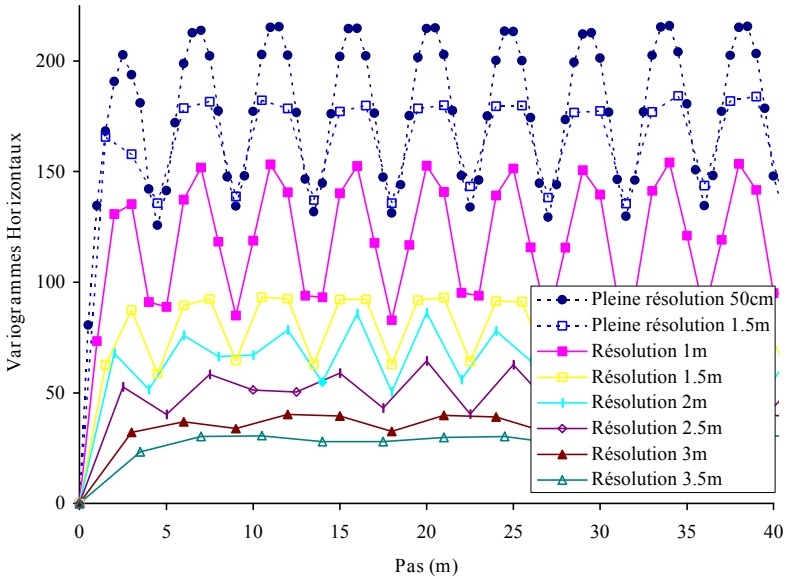
Figure 3-57: Simulations DART de résolution 1.5 m obtenues avec (a) une maquette de 1.5 m de résolution et (b) par moyennage d'une simulation de résolution 0.5 m (Fig. 3-56a).

	0.5m*	1.5m*	1.5m
Réfl $_{\text{sol éclairé}}$	33.56	27.31	34.04
Réfl $_{\text{sol à l'ombre}}$	8.79	8.10	10.04
Réfl $_{\text{houppier}}$	42.1	36.98	43.29

Tableau 3-29: Réflectances moyennes (%) des sols éclairés, sols à l'ombre et houppiers des simulations DART « pleine résolution » 0.5 m* et 1.5 m* et de résolution 1.5 m obtenue par moyennage de la simulation de résolution 0.5m*.



a)



b)

Figure 3-58: Influence de la résolution spatiale dans le proche infrarouge. Variogrammes a) verticaux et b) horizontaux de simulations DART d'une plantation pour diverses résolutions (50 cm, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m et 3 m). Les courbes en trait plein se rapportent aux images obtenues par moyennage de la simulation pleine résolution (50 cm) alors que les courbes en trait pointillé correspondent aux simulations pleine résolution.

En conclusion, nous pouvons dire que l'information texturale diminue avec la dégradation de la résolution spatiale. En effet, un abaissement de la résolution par moyennage entraîne une réduction de la variabilité radiométrique (baisse de la variance, de la hauteur du

palier et lissage des oscillations.) dans le visible et le proche infrarouge même si l'information texturale semble plus facilement perceptible dans ce dernier domaine spectral.

Les études précédentes ont également montré que l'indicateur de portée $1/V_1$ n'est pas systématiquement relié au même paramètre biophysique. Cela dépend de la résolution spatiale du capteur. Dans notre étude, il est directement relié (1) à la taille des couronnes des arbres lorsque la résolution spatiale est inférieure au diamètre du houppier, (2) à la taille des couronnes convoluée avec la résolution spatiale à une résolution spatiale intermédiaire et (3) aux surfaces de sol éclairé (ouverture dans le couvert) à une plus grande résolution spatiale ($\geq$ 3m). De plus, nous avons obtenu des valeurs différentes de $1/V_1$ dans le visible et le proche infrarouge pour des maquettes identiques. Cette constatation souligne le fait que ce paramètre dépend non seulement de la structure du couvert et de la résolution spatiale du capteur mais également des valeurs de réflectance des différents éléments de la scène.

Des questions se posent toutefois dans le cas d'une comparaison de l'information texturale dérivée d'images de simulation et d'images réelles de télédétection. Quelle est la maille d'échantillonnage la plus adaptée lors de la création de maquettes? Est-il préférable de faire des comparaison à partir d'images de simulations « moyennées » ou « pleine résolution »? La maille d'échantillonnage dépend bien évidement de la dimension et de l'arrangement spatial des éléments qui constituent la scène et de la résolution du capteur. De plus, la réponse radiométrique d'un pixel d'une image réelle correspond en première approximation à la somme des réponses radiométriques de tous les éléments qui le composent. C'est pourquoi, il semble plus correct d'effectuer cette comparaison avec des simulations « moyennées» où le pixel correspond à un mélange de plusieurs éléments.

Conclusion partielle:

Les tableaux 3-30 permettent de comparer la sensibilité des paramètres V_o (palier) et V_1 (indicateur de portée) aux (a) caractéristiques biophysiques (dimensions entre les rangées, diamètre des couronnes, positionnement des arbres et LAI) d'une plantation forestière et aux (b) paramètres expérimentaux d'acquisition (configuration angulaire solaire et de visée et résolution spatiale). Il est important d'évaluer si la variabilité des paramètres V_0 ou V_1 associés aux paramètres biophysiques peut être masquée par l'influence des paramètres d'acquisition. Les tableaux 3-30 présentent les résultats obtenus dans le cadre de notre étude. On peut noter en particulier:

- Palier V_0: Le palier est positivement corrélé avec le LAI et négativement corrélé avec le diamètre des couronnes. L'espacement entre les rangs est positivement corrélé avec le palier des variogrammes dans le cas « LAI constant ». Aucun tendance ne se dégage dans le cas « u_f constant ». Le palier augmente également avec une distribution de plus en plus aléatoire des arbres dans la parcelle. Les variations du palier associées aux diamètres des couronnes sont plus importantes que celles associées aux configurations d'illumination et d'observation. La résolution spatiale est un paramètre d'acquisition qui joue un rôle fondamental sur la variabilité du palier V_o. Il est donc important de travailler à une résolution spatiale qui ne masque pas les effets des paramètres biophysiques (LAI, espacements entre rangs et diamètre des couronnes). En conclusion, nous pouvons dire que le palier des variogrammes est un bon indicateur pour la détection d'un changement dans la structure de la canopée, en supposant bien entendu que la végétation du sous-bois reste identique et que l'on se place à une résolution spatiale convenable.

- Indicateur de portée V_1: Le paramètre qui influence le plus la portée est le diamètre des couronnes. La variabilité induite par les autres paramètres biophysiques est beaucoup plus petite. L'espacement entre les rangs et le diamètre des couronnes sont positivement corrélés avec $1/V_1$. On a obtenu une relation entre le LAI et l'indicateur de portée $1/V_1$ uniquement dans le proche infrarouge. Les configurations angulaires d'illumination et d'observation ainsi que le résolution spatiale jouent cependant un rôle important.

	Espacement entre les rangs [4.5 m 7.5 m]	Diamètre des couronnes [1.5 m 4.5 m]	Décalage position des arbres [0 m 1.5 m]	LAI de la parcelle [0 10]
V_1 ou indicateur de portée	VIS: [0.9 1.7]	VIS: [1 3.8] PIR: [0.9 2.2]	VIS: [0.9 1.7]	VIS: SKYL = 0% [3.2 6]; SKYL = 25% [2.2 4.7]; SKYL = 50% [1.6 4.3] PIR: [1.3 1.8]
V_o ou palier	VIS: [4 8]	VIS: [3 10] PIR: [130 210]	VIS: [4.5 6.5]	VIS: SKYL = 0% [2.9 5.6]; SKYL = 25% [1.9 4.3]; SKYL = 50% [1.3 3.8] PIR: [88 218]

a)

	Configuration d'illumination $_s$=148.8° $_s$ [0 90°]	Configuration d'observation $_v$ [0 64.8°] $_v$=230°	Résolution spatiale de 50cm à 3m
V_1 ou indicateur de portée	VIS: [0.8 1.9]	VIS: [1.4 1.7]	VIS: [0.7 1.6] PIR: [1.1 5.6]
V_o ou palier	VIS: [3.7 5.1]	VIS: [1.5 3.5]	VIS: [1.2 4.3] PIR: [53 210]

b)

Tableau 3-30: Ordre de grandeur des paliers et portées de variogrammes dans le cas de variations (a) des caractéristiques biophysiques d'une plantation forestière et (b) des paramètres d'acquisition du capteur. Simulations dans le visible (VIS) et le proche infrarouge (PIR).

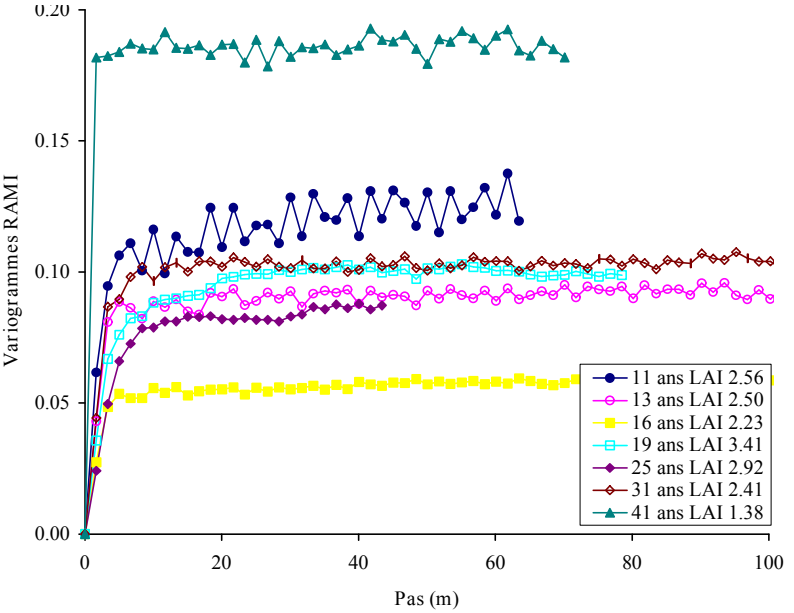
VII. ETUDE DES VARIOGRAMMES RAMI

L'étude qui suit s'appuie sur l'analyse des variogrammes des données aéroportées RAMI acquises au-dessus de parcelles de peuplements de pins maritimes du massif forestier des Landes (cf. §.II.). Le but est (1) de comprendre et d'expliquer les tendances observées à partir des études de sensibilité théoriques, et (2) de préciser dans quelle mesure on peut extraire des informations sur la structure des peuplements (dimension moyenne des couronnes, l'espacement entre les rangées, la densité foliaire, etc.) à partir de l'information texturale de ces images à «haute résolution spatiale».

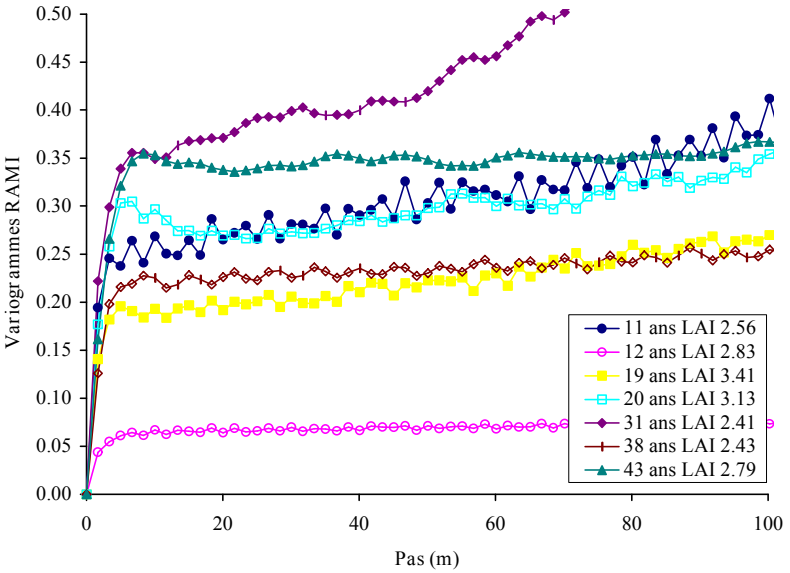
Tous les variogrammes RAMI ont été calculés selon la direction normale aux rangées des plantations, pour les domaines spectraux du visible (vert) et du proche infrarouge.

VII.1. Variogrammes RAMI dans le visible (vert)

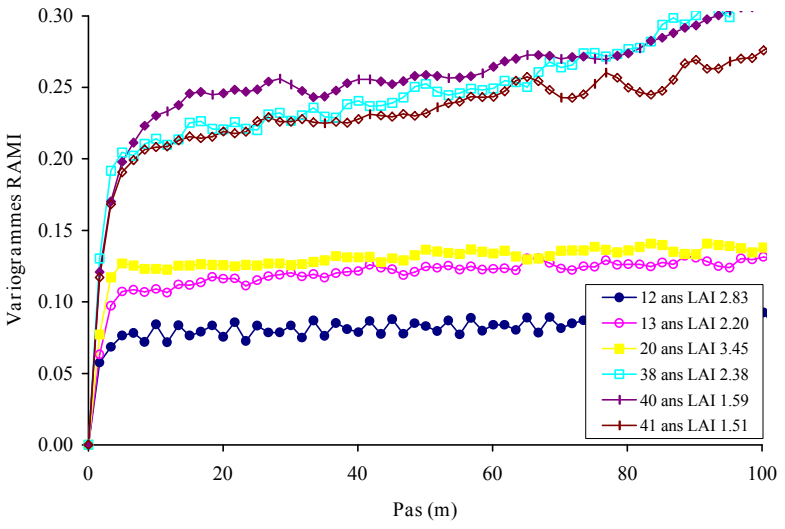
La figure 3-59 montre les variogrammes RAMI de différentes parcelles dans le domaine spectral du visible et pour les quatre axes de vol. Les images des parcelles associées aux variogrammes présentés, figurent dans l'annexe 1.


Variogrammes RAMI
Pas (m)
11 ans LAI 2.56
13 ans LAI 2.50
16 ans LAI 2.23
19 ans LAI 3.41
25 ans LAI 2.92
31 ans LAI 2.41
41 ans LAI 1.38

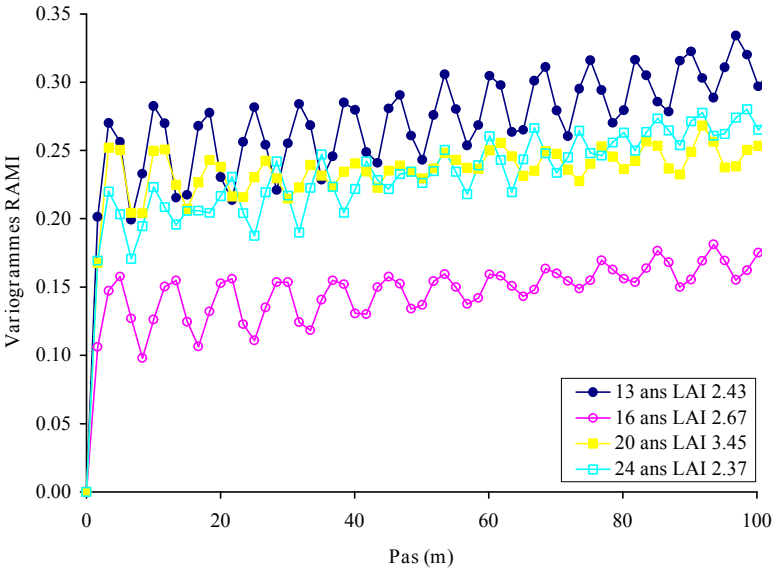
a)


Variogrammes RAMI
Pas (m)
11 ans LAI 2.56
12 ans LAI 2.83
19 ans LAI 3.41
20 ans LAI 3.13
31 ans LAI 2.41
38 ans LAI 2.43
43 ans LAI 2.79

b)


Variogrammes RAMI
Pas (m)
12 ans LAI 2.83
13 ans LAI 2.20
20 ans LAI 3.45
38 ans LAI 2.38
40 ans LAI 1.59
41 ans LAI 1.51

c)



d)

Figure 3-59:

Variogrammes RAMI dans le domaine spectral du visible (vert) pour différentes parcelles de pins ; axe de vol a) N°1, b) N°2, c) N°3 et d) N°4.

D'une manière générale, on constate que:

- Forme des variogrammes: la faible amplitude des oscillations indique que les variogrammes sont peu sensibles à la périodicité des rangées. Les plus grandes amplitudes sont associées aux parcelles de pins les plus jeunes. En effet, pour ces parcelles, la distribution en rangée est encore très bien respectée:

  ⇒ axe de vol 1 et 2: P2022 (11 ans)
  ⇒ axe de vol 3: P770 (12 ans)
  ⇒ axe de vol 4: P980 (13 ans), P390 (16 ans), P1261 (20 ans), P251 (24 ans).

  Les parcelles plus anciennes présentent un couvert plus hétérogène du fait des dépressages successifs, en moyenne tous les quatre ans. Les oscillations sont donc moins nettes, voire inexistantes:

  ⇒ axe de vol 1: P450 (31 ans)
  ⇒ axe de vol 2: P732 (19 ans), P830 (38 ans)
  ⇒ axe de vol 3: P641 (38 ans)

  De plus, la majorité des parcelles de pins d'âge supérieur ou égal à 38 ans (parfois moins), n'a pas été semée en rangs mais correspond à un type de régénération naturelle. Leurs variogrammes ne sont donc pas périodiques. Ils ressemblent aux variogrammes d'une forêt naturelle (Fig3-43):

  ⇒ axe de vol 1: P581 (41 ans)
  ⇒ axe de vol 2: P470 (31 ans), P1200 (43 ans)
  ⇒ axe de vol 3: P191 (40 ans), P192 (41 ans)

- Périodes des variogrammes: l'espacement entre rangs correspondant à la période des variogrammes a été évalué à partir du nombre d'oscillations sur 100m.

  ⇒ axe de vol 1: P2022 (11 ans): 4.23m, P450 (31 ans): 5.79m
  ⇒ axe de vol 2: P2022 (11 ans): 4.03m, P732 (19 ans): 4.59m, P830 (38 ans): 6.46m
  ⇒ axe de vol 3: P770 (12 ans): 4.10m, P641 (38 ans): 6.68m
  ⇒ axe de vol 4: P980 (13 ans): 7.16m, P390 (16 ans): 8.07m, P1261 (20 ans): 7.32m, P251 (24 ans): 6.26m

Les espacements calculés à partir des variogrammes RAMI concordent avec les mesures effectuées sur le terrain: environ 4 / 4.5 m entre 10 et 15 ans, 5 / 6 m entre 30 et 35 ans et de l'ordre de 6 / 7 m au-delà de 35 ans (Guyon et al., 1994). Toutefois, l'axe de vol N°4 présente des résultats surprenants: les variogrammes des différentes parcelles analysées mettent en évidence une structure périodique régulière tous les 4 pixels quelque soit l'âge des pins. Nous avons constaté visuellement sur l'image acquise dans la bande spectrale du vert que cette périodicité ne correspond pas à l'espacement entre les rangées d'arbres mais à un effet de lignage perpendiculairement à l'axe de vol (Fig. 3-60).

Il convient de noter que les variogrammes de la parcelle P2022, observée selon les deux axes de vol 1 et 2 (Fig. 3-1), donnent des évaluations similaires de l'espacement moyen: la différence est de 20cm ce qui est inférieur à la taille du pixel.

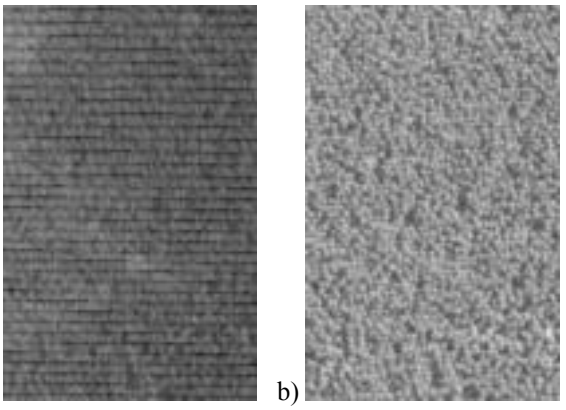


Figure 3-60:
Images RAMI (axe de vol N°4) de la parcelle P251 acquises dans les bandes spectrales du a) vert et du b) proche infrarouge.

- Paliers des variogrammes: la dynamique des paliers des variogrammes des images RAMI, est très faible. Elle varie en effet, entre 0.05 et 0.35 ce qui est beaucoup plus faible que la dynamique associée aux simulations DART. Compte tenu du LAI (entre 1.38 et 3.45) des parcelles échantillonnées, de la présence d'un rayonnement atmosphérique et de la prise en compte des diffusions multiples, les simulations montrent que le palier devrait varier entre 1 et 1.5 dans le visible. Plusieurs causes peuvent expliquer ces différences:

  - Méthodes d'étalonnage et de corrections atmosphériques des données RAMI trop approximatives. Ainsi, les variogrammes de la parcelle P2022 (11 ans) respectivement observée avec les axes de vol 1 et 2, ont des paliers qui diffèrent largement d'un axe à l'autre alors que les angles de visée ne sont pas trop différents. L'atmosphère a tendance à réduire les contrastes des images et de ce fait la variance. Notre méthode de correction, très approximative, a sans doute minimisé la réduction des effets atmosphériques. De plus, la présence de problèmes techniques, clairement illustrée par la dégradation de la qualité radiométrique des images (effet de lignage), a rendu la procédure d'étalonnage plus imprécise.

  - Connaissance imparfaite des caractéristiques optiques et structurales de chaque parcelle. En effet, contrairement aux résultats théoriques, l'augmentation du LAI ne fait pas toujours croître le palier des variogrammes RAMI. Ainsi, les parcelles de plus faibles LAI ont les plus forts paliers. Ces parcelles de LAI inférieur à 2, correspondent aux plus vieilles parcelles de pins (> 35 ans), c'est à dire les parcelles où la dimension des couronnes et la désorganisation des rangées sont

maximales. Dans ce cas, les simulations montrent que la variance des images tend à augmenter. La désorganisation spatiale du couvert joue donc alors un rôle plus important que l'augmentation du LAI.

- Non prise en compte des effets d'environnement dus aux surfaces voisines du pixel considéré: Le rayonnement réfléchi par ces surfaces affecte en effet la réflectance apparente du pixel, ce qui diminue le contraste des images. De ce fait, la variance des images à tendance à diminuer et le palier des variogrammes également.
- Les tendances observées avec les images RAMI doivent être comparées à celles obtenues avec des images simulées à haute résolution spatiale puis dégradées à la résolution RAMI. Conformément aux résultats obtenus dans le §.VI. (Influence de la résolution spatiale sur l'information texturale), il aurait été plus correct d'effectuer des comparaisons avec des simulations « moyennées », où le pixel correspond à un mélange de plusieurs éléments. Ceci a pour effet de diminuer fortement le palier des variogrammes, ce qui peut également être à l'origine des différences observées.
- De plus, on peut supposer que le champ de vue instantané (IFOV) ne correspond pas exactement à la taille des pixels RAMI, mais « voie » une surface un peu plus grande. Dans ce cas, la réponse radiométrique de chaque pixel correspond à la réponse radiométrique moyenne du pixel et d'une partie de ces voisins. Cet aspect est directement lié à la fonction de transfert du capteur. Il est mis en évidence lors de la comparaison des images réelles et simulées. La disposition régulière apparaît beaucoup mieux sur l'image simulée. De même que l'effet atmosphérique d'environnement, la fonction de transfert instrumentale contribue à rendre l'image moins nette et moins contrastée ce qui diminue V_0 et $1/V_1$.
- Le sous-bois a été supposé homogène au niveau des simulations DART d'une part, dans un souci de simplification de manière à déterminer directement l'influence des paramètres biophysiques de la canopée et d'autre part, compte tenu de la difficulté pour évaluer sur le terrain l'hétérogénéité à prendre en compte pour la modélisation. En fait, le sous-bois peut varier fortement d'une parcelle à l'autre. L'hétérogénéité du sous-bois dépend en particulier du type d'entretien par les forestiers. Le fait de ne pas prendre en compte cette hétérogénéité conduit à une surestimation de la réflectance du sol ce qui contribue à augmenter les contrastes locaux et par conséquent la variance de l'image et le palier des variogrammes. Une possibilité aurait été de faire des mesures terrain de la fonction de réflectance bidirectionnelle du sous-bois directement de manière à les prendre en compte pour les simulations. Malheureusement, ces mesures n'ont pu être faites au moment de l'acquisition des données RAMI.

- Indicateurs de portée des variogrammes: Les valeurs expérimentales de V_1 sont en moyenne plus faibles que les valeurs théoriques et ne présentent pas de relation particulière avec l'âge des arbres.

VII.2. Variogrammes RAMI dans le proche infrarouge

Les variogrammes RAMI (Fig. 3-62) calculés sur les images proche infrarouge des parcelles du paragraphe précédent montrent que:

- Forme des variogrammes: les variogrammes sont plus sensibles à la périodicité des rangées d'arbres que dans le vert. Les oscillations sont beaucoup plus marquées. Tous les variogrammes qui ont des oscillations bien marquées dans le visible ont également de fortes oscillations dans le proche infrarouge. Les variogrammes de l'axe N°4 ont montré que l'effet de lignage observé dans le vert, n'a pas été constaté dans le proche infrarouge (Fig. 3-59). De plus, un nombre important de parcelles présentant dans le visible des variogrammes sans oscillations ou avec des oscillations peu marquées ont des variogrammes périodiques dans le proche infrarouge:

  ⇒ axe de vol 1: P2102 (13 ans) ; P330 (16 ans)
  ⇒ axe de vol 2: P770 (12 ans) ; P470 (31 ans)
  ⇒ axe de vol 3: P650 (13 ans) ; P191 (40 ans)

  Certains variogrammes de parcelles où les arbres sont cependant alignés, ne présentent aucune forme périodique dans le visible et dans le proche infrarouge:

  ⇒ axe de vol 1: P733 (19 ans)
  ⇒ axe de vol 2: P1292 (20 ans)
  ⇒ axe de vol 3: P1261 (20 ans)

- Périodes des variogrammes: On retrouve dans le proche infrarouge, les mêmes estimations ou des estimations très proches (différence inférieure à 20 cm) de l'espacement entre les rangées pour les parcelles qui présentent des variogrammes périodiques dans le visible. Les variogrammes des parcelles P980 (13 ans) et P390 (16 ans) de l'axe de vol N°4 qui n'avaient pas pu être analysés dans le visible à cause d'un « défaut » d'acquisition des données, donnent des estimations correctes de l'espacement entre rangs dans le proche infrarouge: 4.10 m pour les 2 parcelles.

  L'espacement entre les rangées peut également être évaluées pour les parcelles qui présentent des variogrammes périodiques uniquement dans le proche infrarouge.

  ⇒ axe de vol 1: P2102 (13 ans): 4.17 m ; P330 (16 ans): 4.80 m
  ⇒ axe de vol 2: P770 (12 ans): 4.03 m ; P470 (31 ans): 8.80 m
  ⇒ axe de vol 3: P650 (13 ans): 4.10 m ; P191 (40 ans): 11.13 m

  Ces résultats concordent avec les espacements moyens estimés avec l'âge des pins.

- Paliers des variogrammes: La dynamique des paliers RAMI varie entre 10 et 50 environ. Ceci est, comme dans le visible, plus faible que pour les paliers obtenus à partir des simulations DART. Les mêmes causes explicitées dans le visible peuvent partiellement expliquer ces différences: les procédures approximatives d'étalonnage et de corrections atmosphériques des données RAMI, la non prise en compte des caractéristiques optiques et structurales spécifiques à chaque parcelle, les effets d'environnement, la dimension angulaire du champ de vue instantané du capteur, etc.

- Indicateurs de portées des variogrammes: Les valeurs expérimentales de V_1 obtenues dans le proche infrarouge sont en général plus fortes que dans le vert mais restent en moyenne plus faibles que les valeurs théoriques DART. Il semble se dégager une relation linéaire entre l'âge des pins et l'indicateur de portée $1/V_1$ (Fig. 3-61). Les parcelles dont l'âge est supérieur à 30 ans n'ont pas été retenues compte tenu du fait que la majorité d'entre elles n'ont pas une structure régulière en rangs. On retrouve le fait qu'une augmentation de $1/V_1$ s'explique par l'augmentation du diamètre des pins et de l'espacement entre les rangs avec l'âge croissant des pins.

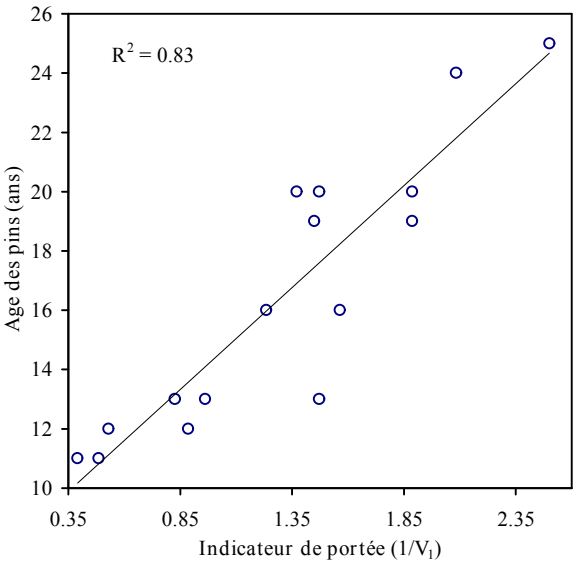
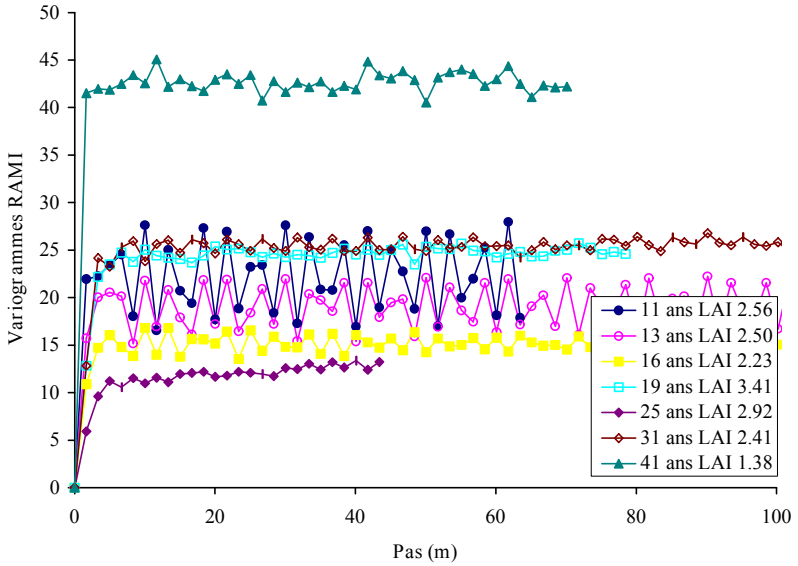


Figure 3-61:

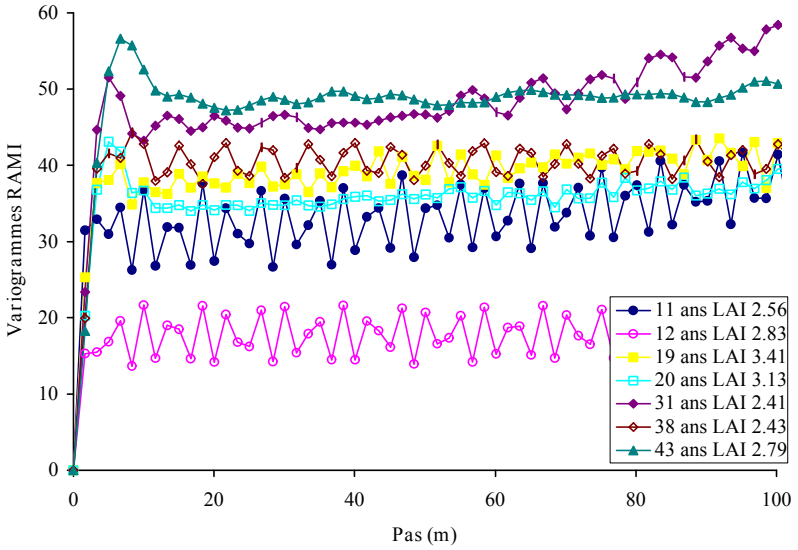
Relation entre l'âge des pins et les portées des variogrammes calculés sur les images RAMI de plantations forestières dans le domaine spectral du proche infrarouge.

		V_0 ou palier		V_1 ou indicateur de portée	
Axe de vol	Parcelle et Âge des pins	VIS	PIR	VIS	PIR
N°1	P2022: 11 ans	0.12	22.24	0.40	2.56
	P2102: 13 ans	0.09	19.16	0.48	1.21
	P330: 16 ans	0.06	15.23	0.43	0.81
	P733: 19 ans	0.10	24.76	0.26	0.53
	P140: 25 ans	0.08	12.23	0.27	0.40
	P450: 31 ans	0.10	25.52	0.42	0.53
	P581: 41 ans	0.19	42.68	2.23	2.14
N°2	P2022: 11 ans	0.30	32.71	0.45	2.06
	P770: 12 ans	0.07	18.06	0.39	1.13
	P732: 19 ans	0.22	39.11	0.53	0.69
	P1192: 20 ans	0.29	35.94	0.62	0.73
	P470: 31 ans	0.44	47.43	0.24	0.58
	P830: 38 ans	0.23	40.71	0.50	0.58
	P1200: 43 ans	0.35	49.29	0.44	0.49
N°3	P770: 12 ans	0.08	12.00	0.63	1.89
	P650: 13 ans	0.12	12.17	0.42	0.68
	P1261: 20 ans	0.13	17.10	0.58	0.53
	P641: 38 ans	0.24	25.26	0.37	0.46
	P191: 40 ans	0.26	26.17	0.29	0.34
	P192: 41 ans	0.23	23.70	0.33	0.33
N°4	P980: 13 ans	0.27	28.24	0.87	1.04
	P390: 16 ans	0.14	20.71	0.89	0.64
	P1261: 20 ans	0.23	38.28	0.89	0.68
	P251: 24 ans	0.23	29.43	0.76	0.48

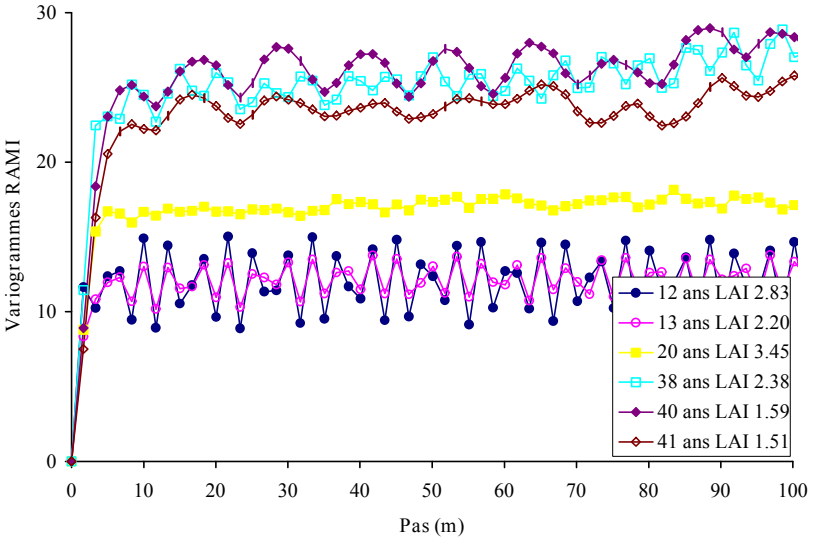
Tableau 3-31: Paliers et indicateurs de portée des variogrammes calculés sur des images RAMI de parcelles forestières dans le visible (vert) et le proche infrarouge. Les 4 axes de vol ont été considérés.


Variogrammes RAMI
Pas (m)
11 ans LAI 2.56
13 ans LAI 2.50
16 ans LAI 2.23
19 ans LAI 3.41
25 ans LAI 2.92
31 ans LAI 2.41
41 ans LAI 1.38

a)


Variogrammes RAMI
Pas (m)
11 ans LAI 2.56
12 ans LAI 2.83
19 ans LAI 3.41
20 ans LAI 3.13
31 ans LAI 2.41
38 ans LAI 2.43
43 ans LAI 2.79

b)


Variogrammes RAMI
Pas (m)
12 ans LAI 2.83
13 ans LAI 2.20
20 ans LAI 3.45
38 ans LAI 2.38
40 ans LAI 1.59
41 ans LAI 1.51

c)

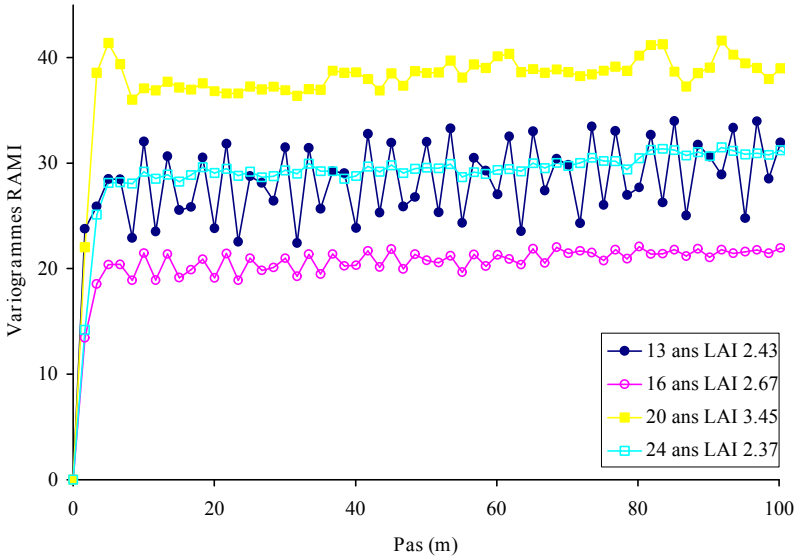


Figure 3-62: Variogrammes RAMI dans le domaine spectral du proche infrarouge pour différentes parcelles de pins ; axe de vol a) N°1, b) N°2, c) N°3 et d) N°4.

d)

VIII. CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Cette étude a permis d'étudier de manière qualitative mais aussi quantitative, l'influence des paramètres biophysiques des plantations forestières tels que le taux de couverture, l'indice foliaire, l'espacement entre les rangées d'arbres, etc. sur la texture d'images « haute résolution spatiale ». Elle a été menée dans un premier temps, de manière théorique, à l'aide d'images obtenues par simulation dans le visible et parfois dans le proche infrarouge. L'intérêt de cette approche est de pouvoir contrôler tous les paramètres ce qui permet une meilleure analyse des résultats obtenus. La texture des images a été évaluée à l'aide de variogrammes. Ils ont été ajustés avec un modèle exponentiel. Le variogramme a été choisi pour sa rapidité de calcul et sa facilité d'utilisation. Sa représentation graphique permet de donner des informations sur l'organisation spatiale et la structure des éléments dans l'image (forme, périodicité, portée, etc.) et de quantifier la variabilité radiométrique dans l'image selon une direction (palier, amplitude des oscillations, etc.).

Une étude préliminaire a permis de souligner l'importance d'utiliser un modèle de réflectance précis (prise en compte de la structure géométrique du couvert et des interactions multiples pour la diffusion du rayonnement) pour étudier l'information texturale. Des modèles moins précis tels que les modèles géométriques conduisent systématiquement à une mauvaise évaluation des réflectances des différents éléments de la scène et par conséquent à des paramètres texturaux (V_0 et V_1) très différents ; ces paramètres étant particulièrement sensibles aux réflectances mais aussi aux différences de réflectance entre les éléments.

L'étude a également permis d'établir la sensibilité des variogrammes à plusieurs paramètres biophysiques: Il est apparu que les variogrammes sont de forme périodique dans le cas d'une plantation forestière où l'alignement des rangées d'arbres est relativement régulier. La forme périodique tend à disparaître avec une désorganisation spatiale des rangées. Dans le cas d'un alignement régulier, la période des variogrammes restitue fidèlement l'espacement entre les rangs. De plus, l'amplitude des oscillations périodiques est fortement corrélée à la différence de réflectance entre les couronnes des arbres et le sous-bois. Les études de sensibilité ont montré également que la portée est sensible à la dimension des couronnes et à l'espacement entre les rangées. L'influence du LAI a été testée dans le visible et le proche infrarouge. Dans les deux cas, le palier augmente avec le LAI en particulier pour les faibles

LAI, puis sature. L'éclairement atmosphérique tend à resserrer la dynamique des variogrammes dans le visible. Dans le proche infrarouge, son influence est moins importante.

Dans un deuxième temps, l'influence des paramètres d'acquisition (configurations angulaires d'illumination et de visée, résolution spatiale) ont été également testés. Cette étude a mis en évidence l'importance de ces paramètres. Par exemple, les images deviennent de plus en plus homogènes avec l'augmentation de l'angle de visée ce qui conduit à une baisse du palier. Les résultats ont également montré que l'influence des paramètres expérimentaux ne masque pas l'influence des paramètres biophysiques tant que l'on travaille à une résolution spatiale du capteur suffisamment fine.

Les résultats obtenus à partir des images de simulation ont été comparés avec ceux des images du radiomètre aéroporté RAMI acquises au dessus d'une plantation de pins maritimes dans les Landes. Des résultats similaires ont été observés au niveau de la périodicité et de la forme des variogrammes. Cependant, les tendances observées au niveau des paliers RAMI montrent qu'ils sont toujours plus bas que ceux des simulations DART. Plusieurs causes ont été avancées pour expliquer l'origine de ces différences: les procédures approximatives d'étalonnage et de corrections atmosphériques des données RAMI, la non prise en compte de la structure du sous-bois et des propriétés optiques des éléments foliaires caractéristiques de chaque parcelle, les effets d'environnement et le champ de vue instantané.

Finalement, cette étude a permis d'illustrer le potentiel de la modélisation physique pour étudier l'information texturale d'images de télédétection de parcelles forestières observées à différentes résolutions spatiales et selon différentes configurations d'observation et d'éclairement.

CHAPITRE 4

APPORTS POTENTIELS DE LA HAUTE RÉSOLUTION SPECTRALE POUR LES ÉTUDES FORESTIERES

I. INTRODUCTION

La connaissance de la biochimie foliaire est essentielle pour décrire et modéliser les processus des systèmes forestiers tels que la productivité primaire (Vitousek, 1982), le taux de décomposition de la litière (Meentemeyer, 1978 ; Melillo et al., 1982), ainsi que les cycles et la disponibilité de nutriments comme l'azote (Birk et Vitousek, 1986). La détermination des composés biochimiques des couverts et de la litière permet de déterminer les flux et réservoirs d'éléments majeurs tels que le carbone, l'azote, le phosphore et le soufre. De même, la disponibilité de nutriments dans les sols a un rôle régulateur sur des processus tels que la photosynthèse, la décomposition, l'allocation de carbone, la minéralisation et les pertes par lessivage et volatilisation. Ainsi, la décomposition est fonction du climat et de la lignine foliaire. La présence de lignine dans la litière ralentit la décomposition microbiologique dans le sol (Joffre et al., 1992), ce qui ralentit la conversion des protéines foliaires en azote minéral: le rapport des concentrations initiales de lignine et d'azote est inversement proportionnel au taux de décomposition (Webster and Benfield, 1986). D'autre part, Aber et al. (1990) ont montré une relation directe entre la concentration en azote du couvert et la productivité des forêts. Selon Vitousek (1982), la proportionnalité entre l'azote foliaire et la productivité des forêts est plus forte pour les feuillus que pour les conifères.

L'information « biochimique » provient souvent d'analyses chimiques destructrices, coûteuses et longues à mettre en oeuvre. Dans le cas de couverts forestiers, son évaluation nécessite la plupart du temps de couvrir de grandes zones parfois difficiles à échantillonner. Ces difficultés soulignent l'intérêt de méthodes alternatives telles que la spectrométrie aéroportée et spatiale dans le visible et l'infrarouge.

La présence de bandes d'absorption dans les éléments foliaires constituant le couvert est à la base de l'étude de la chimie des couverts avec la technologie appelée « Haute Résolution Spectrale (HRS) » (Burns et Ciurczark, 1992). L'absorption est essentiellement due aux changements d'états d'énergie de vibration des molécules des éléments cellulaires. Les modes fondamentaux surviennent essentiellement au delà de 2.5 µm. Les modes de vibration apparaissent dans le proche infrarouge (PIR) et moyen infrarouge (MIR) sous la forme de nombreuses combinaisons linéaires d'harmoniques, avec des intensités dix à cent fois plus faibles que les fondamentaux correspondants. De ce fait, l'information biochimique est distribuée sur l'ensemble du proche et du moyen infrarouge, avec un maximum dans certaines parties du spectre (Barton et al., 1992). Les modes d'étirement des liaisons C — H, N — H, C — O et O — H sont les principaux indicateurs des composants organiques. L'intensité des bandes décroît fortement avec l'ordre de l'harmonique (Murray et Williams, 1987 ; Curran, 1989). Ces bandes d'absorption sont perceptibles dans les spectres de réflectance des feuilles déshydratées car l'absorption causée par l'eau est alors très réduite. Le recouvrement des bandes d'absorption explique la difficulté, et même en général, l'impossibilité de détecter un composé chimique avec une seule bande spectrale. D'une manière générale, les caractéristiques d'absorption des végétaux sont assez proches:

- la plupart des matériaux foliaires sont composés des mêmes constituants biochimiques, dans des proportions cependant différentes selon les espèces et les sites. Il en résulte que les concentrations des composants chimiques foliaires sont souvent corrélées.
- les phénomènes d'absorption sont surtout liés à des mécanismes d'absorption vibrationnelle associés aux atomes C, H, N et O, contrairement aux minéraux où les

absorptions sont dues à des radicaux tels que les carbonates qui peuvent être liés à de nombreux éléments (Ca, K, Al, etc.). Par suite, les composants foliaires ont de nombreuses caractéristiques spectrales communes.

Au niveau du laboratoire, la détermination spectrométrique des concentrations chimiques en éléments contenant les liaisons C — H, N — H, C — O et O — H, est souvent basée sur des études de régression, en général des régressions pas à pas. Généralement, les spectres de réflectance sont mesurés sur des poudres séchées d'éléments foliaires. Les régressions, et plus particulièrement les régressions pas à pas sont très intéressantes car elles permettent d'obtenir les meilleures combinaisons linéaires de mesures spectrales pour évaluer les concentrations chimiques. L'expérience montre que les bandes spectrales retenues ne correspondent pas forcément à des bandes d'absorption des composés. Ces régressions multi-linéaires de bandes spectrales sont souvent appelées «équations prédictives»:

$$[\text{Concentration (\% MS)}] = C_0 + \sum C_i . S(\lambda),$$

où $S(\lambda)$ sont les mesures spectrales et C_0 et C_i sont les coefficients de la régression.

L'efficacité des méthodes spectrométriques de laboratoire est maintenant bien établie et testée pour diverses applications telles que l'évaluation de la qualité du fourrage (Williams et Norris, 1990). Ainsi, la précision et la répétitivité des estimations spectrométriques en laboratoire des concentrations en protéine, lignine et amidon dans les végétaux séchés sont tout à fait comparables à celles obtenues à l'aide d'analyses chimiques (Curran, 1989). Un problème important est de savoir si des données spectrométriques obtenues par télédétection aéroportée ou spatiale (HRS) permettent aussi d'évaluer la composition chimique des couverts végétaux. Si tel est le cas, alors la télédétection est appelée à devenir un outil extrêmement utile pour décrire et modéliser les processus de fonctionnement des écosystèmes ainsi que les cycles des nutriments à la fois aux petites et grandes échelles (Wessman, 1990).

Dans ce contexte, plusieurs études ont été conduites pour étudier le potentiel de données « haute résolution spectrale » aéroportées à l'évaluation de la chimie des couverts forestiers. Un certain nombre de travaux ont donné des résultats encourageants (Peterson et Hubbard, 1992 ; Gastellu-Etchegorry et al., 1995). Ainsi, à partir de données AIS (Airborne Imaging Spectrometer) acquises au dessus de forêts de feuillus et de conifères combinées à des mesures terrain, Wessman et al. (1989) ont établi des équations prédictives des concentrations en lignine et ont obtenu de fortes corrélations ($r^2 > 80\%$) entre les concentrations foliaires réelles et estimées de lignine. La lignine estimée a été calculée à partir de dérivées de réflectances du couvert centrées sur la longueur d'onde $\lambda = 1256$ nm, associée à des mécanismes d'absorption de la liaison C — H, et $\lambda = 1555$ nm et $\lambda = 1311$ nm, certainement associées à la liaison O — H. Johnson et al. (1994) ont établi également des équations prédictives des concentrations biochimiques (concentration biochimique foliaire × LAI) à l'aide de régressions entre la composition biochimique de couverts forestiers et le spectre de dérivées premières de réflectances $\log(\frac{1}{R})$ AVIRIS (Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer). Ils ont obtenu de fortes corrélations entre les concentrations réelles et simulées, à partir seulement 3 longueurs d'onde parmi 210:

- azote ($r^2 = 90\%$; $\lambda = 752$ nm / 1593 nm / 2283 nm),
- chlorophylle ($r^2 = 94\%$; $\lambda = 752$ nm / 1069 nm / 935 nm),
- lignine ($r^2 = 93\%$; $\lambda = 1297$ nm / 1261 nm / 2353 nm),

- LAI (r^2 = 97% ; λ = 752 nm / 1280 nm / 1165 nm) et
- amidon (r^2 = 56% ; λ = 1194 nm / 1268 nm / 810 nm).

Le fait de considérer la concentration biochimique foliaire au lieu de la concentration biochimique du couvert a donné des corrélations plus faibles, à l'exception de l'amidon:

- azote (r^2 = 85% ; λ = 552 nm / 1184 nm / 2164 nm),
- chlorophylle (r^2 = 71% ; λ = 1069 nm / 1683 nm / 858 nm),
- lignine (r^2 = 93% ; λ = 1624 nm / 2005 nm / 1060 nm) et
- amidon (r^2 = 64% ; λ = 868 nm / 810 nm / 2184 nm).

Les travaux menés à ce jour donnent en général des équations prédictives variables selon les sites d'étude et les dates d'acquisition des données. Des facteurs « externes » tels que l'atmosphère, l'instrumentation et la structure des couverts sont en général mentionnés pour expliquer la difficulté d'établir des équations « robustes ». Fourty et al. (1996), par contre, concluent à l'impossibilité de déterminer des relations entre les concentrations biochimiques (lignine, cellulose, azote, etc.) et les réflectances de feuilles hydratées. Selon ces auteurs, il est impossible de relier les mesures de télédétection à la composition biochimique des couverts. Le problème est donc de savoir si de telles relations existent réellement pour un site donné et dans quelle mesure elles sont extrapolables à d'autres sites et pour d'autres configurations d'observation. Dans le cadre de mon travail de thèse, j'ai mis en oeuvre deux approches pour étudier ce problème: (1) une approche empirique avec des mesures expérimentales de laboratoire et aéroportées et (2) une approche « modélisation physique du transfert radiatif » pour l'évaluation de la robustesse des relations prédictives. Ces deux approches sont décrites dans ce chapitre.

II. APPROCHE EXPERIMENTALE

II.1. Données expérimentales

II.1.1. Zone d'étude

La zone d'étude est la forêt de Nézer dans les Landes (cf. chapitre 3). Deux campagnes « spectrométriques » aéroportées et de terrain ont été organisées sur ce site en 1991 et 1993. Les résultats relatifs à la campagne de 1991 (Zagolski, 1994) sont simplement résumés pour permettre une comparaison avec les résultats obtenus avec la campagne de 1993 à laquelle j'ai participé.

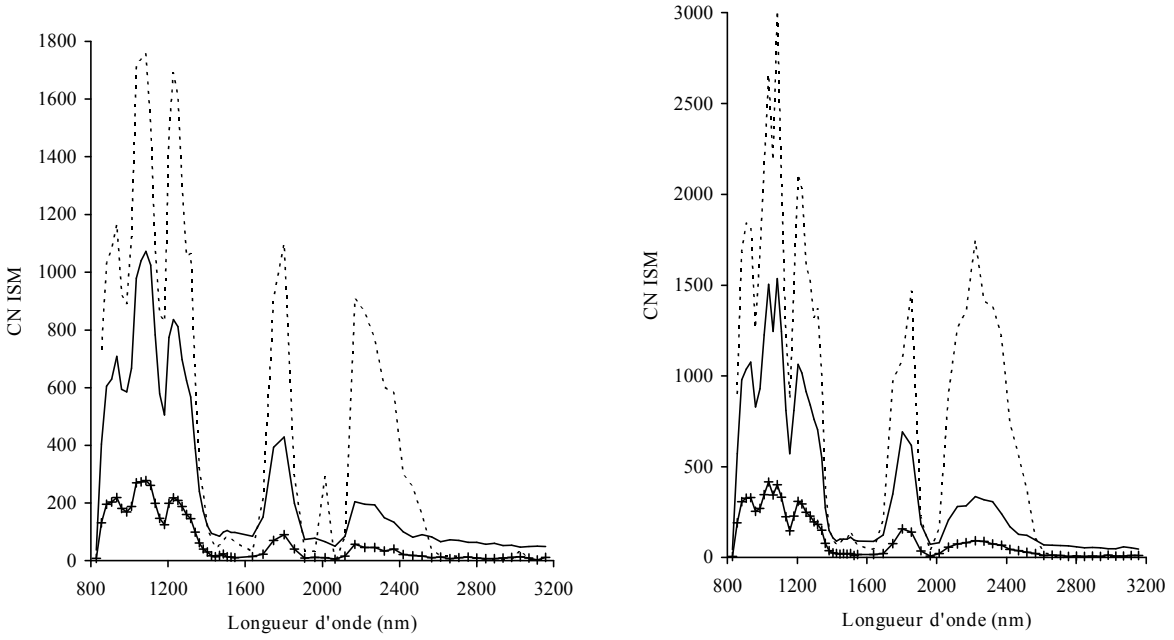
II.1.2. Mesures spectrométriques aéroportées

II.1.2.1. Acquisition des données

Les données aéroportées utilisées sont des données AVIRIS, acquises en 1991 durant la campagne Mac Europe de la NASA/JPL, et des données ISM (Infrared SpectroMeter) acquises durant la campagne CNRS/CNES en Mai 1993.

- Le spectromètre AVIRIS comprend 210 canaux spectraux contigus de 10 nm de large couvrant l'intervalle [0.4 µm 2.45 µm]. Le champ de vue instantané est de 1 mrad. Six images ont été acquises durant le vol effectué à 20 km d'altitude, ce qui a conduit à une taille de pixel de 20m.

- Le spectromètre ISM a été développé à l'origine pour une mission planétaire par les laboratoires de recherches spatiales OPM (Observatoire Paris-Meudon), IAS (Institut d'Astrophysique Spatiale) et DESPA (Département d'Étude SPAtiale) (Bibring et al., 1990). En collaboration avec d'autres laboratoires, le CESR (Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements) a modifié le second prototype de l'instrument ISM pour l'intégrer à bord de l'avion de télédétection ARAT et ainsi obtenir un spectromètre aéroporté pour l'étude des surfaces terrestres. L'instrument ISM comprend 64 canaux contigus de 12.5 nm de résolution dans le domaine [0.8 µm 1.5 µm] et 64 canaux de 25 nm dans le domaine [1.6 µm 3.2 µm]. L'angle de vue instantané est 2.33 mrad. Le spectre solaire est enregistré à bord, ainsi que les images d'une caméra RVB co-alignée, en vue d'un recalage ultérieur des mesures ISM (Zagolski et al., 1992). Du fait de la faible vitesse angulaire du miroir de balayage, les données ISM ne correspondent pas à des images mais plutôt à des profils, ce qui s'est avéré être une contrainte très limitative pour les corrections géométriques et atmosphériques.



a) b)

Figure 4-1: Spectres ISM de 3 types de paysage: sable (- -), forêt de pins ( ) et lac ( ) ; canaux (a) impairs et (b) pairs.

II.1.2.2. Corrections radiométriques

- La transformation des comptes numériques AVIRIS en luminance a été effectuée à l'aide de coefficients d'étalonnage fournis par le JPL (Jet Propulsion Laboratory). Compte tenu de problèmes instrumentaux, les canaux supérieurs à 2270 nm se sont avérés très bruités. Cet effet a été minimisé en considérant des moyennes radiométriques sur de grandes parcelles.

- Des étalonnages internes de l'instrument ISM ont été effectués à bord de l'avion avant et après chaque acquisition des données. Elles ont permis de soustraire aux spectres ISM un bruit de fond. De plus, une FFT (Fast Fourier Transformation) a été appliquée à toutes les données pour enlever une basse fréquence causée par une vibration mécanique durant l'acquisition des données en vol. Cette dernière ne modifiait pas de manière significative les spectres moyens ISM. De plus, compte tenu

de la non disponibilité des coefficients d'étalonnage, les analyses des spectres ISM (Fig. 4-1) ont été basées sur de simples rapports de bandes spectrales pour minimiser cette contrainte majeure.

II.1.2.3. Corrections géométriques

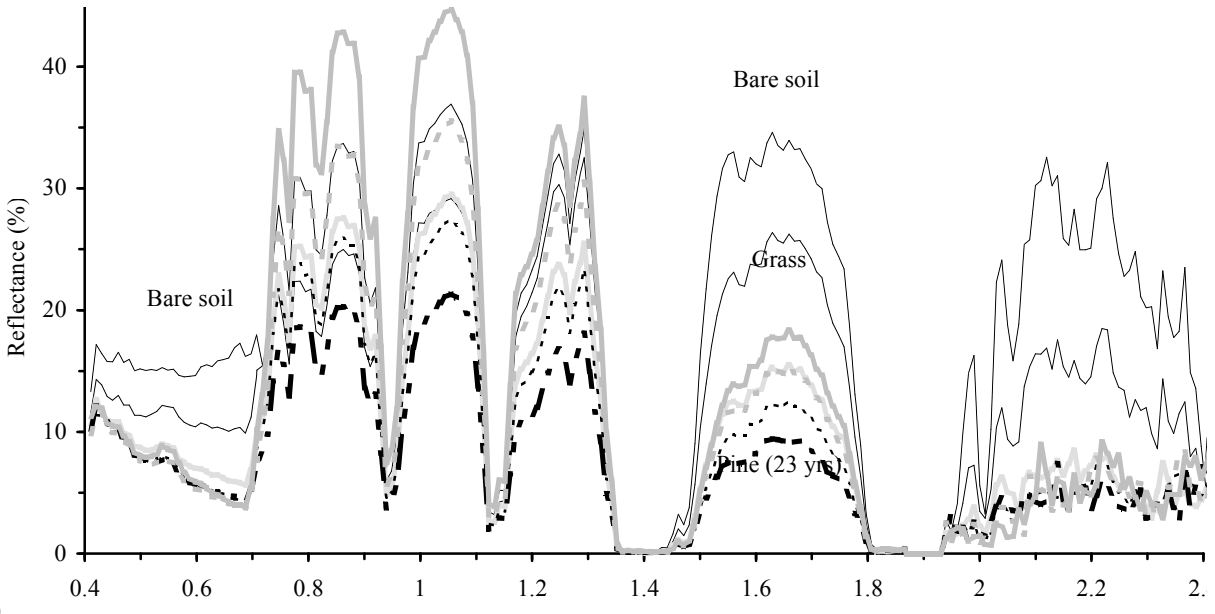
- Les conditions de vol pendant l'acquisition des données AVIRIS ayant été stables, les données AVIRIS ont seulement été corrigées des effets panoramiques à l'aide d'un sur-échantillonnage bi-linéaire.
- L'instrument ISM n'étant pas imageur, il a été nécessaire de faire des corrections géométriques très précises. Elles ont été conduites à l'aide des informations acquises par une plate-forme embarquée à bord de l'avion:

  ⇒ position de l'avion: latitude, longitude et altitude.

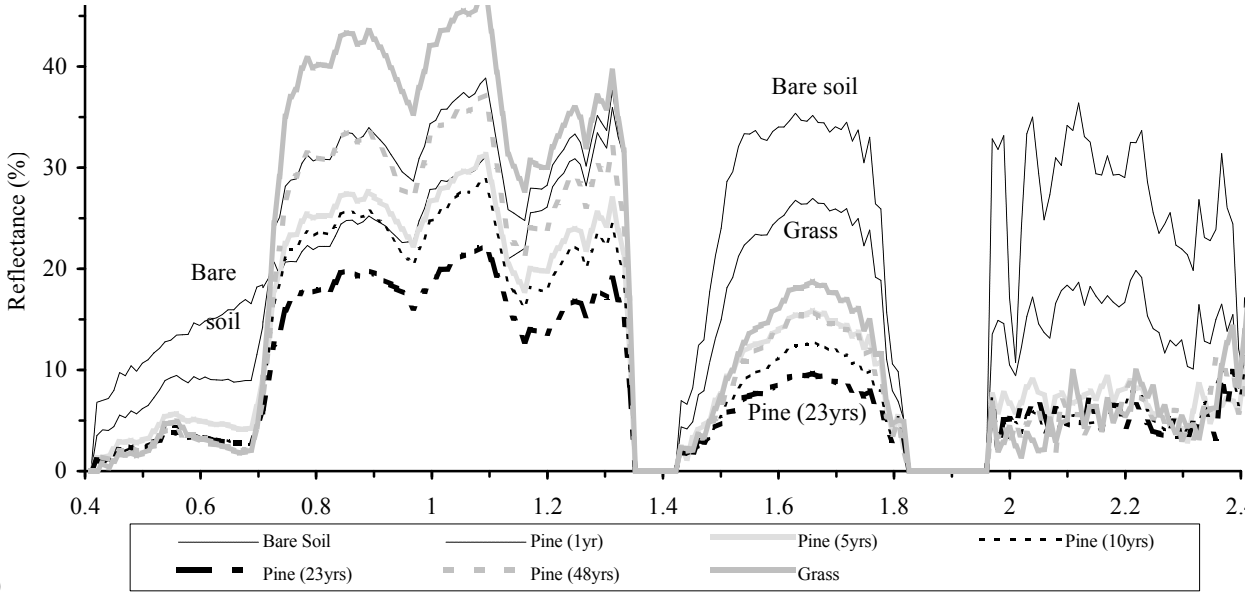
  ⇒ paramètres de navigation aérienne : roulis, tangage, dérive, vitesse, cap géographique, etc.

II.1.2.4. Corrections atmosphériques

- Une étude (Zagolski et Gastellu-Etchegorry, 1995) a montré que les effets atmosphériques ne sont pas négligeables au niveau de la réflectance AVIRIS des surfaces observées dans le domaine infrarouge. En effet, ils s'élèvent jusqu'à 5% dans le domaine spectral [1500 1700 nm] et jusqu'à 10% dans le domaine [2100 2300 nm] en fonction de la longueur d'onde et de la réflectance de la surface visée et des surfaces voisines. Ces effets peuvent représenter 80% du signal pour des surfaces de végétation dense dans le visible et 50% pour des surfaces sombres dans le proche infrarouge. En conséquence, des corrections atmosphériques (Zagolski et Gastellu-Etchegorry, 1995), avec la prise en compte des effets d'environnement, ont été systématiquement réalisées sur l'ensembles des images AVIRIS.



a)



b)

Figure 4-2: Spectres de réflectance AVIRIS : a)sans correction et b)avec correction atmosphérique.

La figure 4-2 montre des spectres de réflectance AVIRIS de plusieurs types de zones au-dessus de l'atmosphère et corrigés des effets atmosphériques. La structure des couverts et l'indice foliaire (LAI) apparaissent avoir des effets opposés dans le proche infrarouge et additifs dans le moyen infrarouge. Ainsi, la réflectance des parcelles dans le proche infrarouge décroît avec l'âge des arbres: l'effet de structure domine l'augmentation du LAI. Dans le moyen infrarouge, la décroissance de la réflectance avec l'âge est encore plus forte car les effets du LAI et de la structure s'additionnent. Par contre, les unités de surface qui ont des structures similaires (sol nu, herbe, repousse) ont des comportements opposés dans le proche infrarouge et moyen infrarouge. Les parcelles de pins de 23 ans ont les plus faibles réflectances dans le proche infrarouge et le moyen infrarouge car elles sont sujettes aux effets de structure maximaux compte tenu de la combinaison « hauteur des arbres » et « distances entre arbres».

- L'instrument ISM n'étant pas un spectromètre imageur, des corrections atmosphériques n'ont pas pu être réalisées en prenant en compte les effets d'environnement. Du fait de l'indisponibilité des coefficients d'étalonnage et de manière à minimiser les effets atmosphériques, les mesures ISM $CN^{ISM}(\lambda)$ ont été converties sous la forme $\log(\frac{CN^{ISM}(\lambda) - CN^{ISM}_{H_2O}(\lambda)}{CN^{ISM}(\lambda_{réf}) - CN^{ISM}_{H_2O}(\lambda_{réf})})$, où $CN^{ISM}_{H_2O}$ est la mesure de l'eau, déterminée à partir d'un survol du lac de Cazaux et $CN^{ISM}(\lambda_{réf})$ est la réflectance de la surface visée à une longueur d'onde de référence non associée à une bande d'absorption (Pinel et al., 1994). La formulation mathématique de ces rapports dérive d'une représentation simplifiée du transfert radiatif du sol au capteur à travers l'atmosphère. En effet, à la longueur d'onde λ, on a :

$$L^{ISM}(\lambda) = L(\lambda).T(\lambda) + L_{atm}(\lambda) \qquad (1)$$

$$L^{ISM}_{H_2O}(\lambda) = L_{H_2O}(\lambda).T(\lambda) + L_{atm}(\lambda) \quad (2)$$

où $L(\lambda)$ est la luminance de la surface visée au niveau du sol, $L^{ISM}(\lambda)$ est la luminance de la surface au niveau du capteur, $T(\lambda)$ est la transmittance atmosphérique entre le sol

et le capteur et $L_{atm}(\lambda)$ est la luminance atmosphérique. Les mesures ISM CN^{ISM} sont supposées proportionnelles aux luminances L. La soustraction de (1) et (2) donne :

$$L^{ISM}(\lambda) - L^{ISM}_{H_2O}(\lambda) = [L(\lambda) - L_{H_2O}(\lambda)].T(\lambda)$$

$$\approx L(\lambda).T(\lambda) \text{ car la réflectance de l' eau}$$

est très proche de zéro dans le proche infrarouge. Si on effectue un rapport à deux longueurs d'onde λ et $\lambda_{réf}$, on obtient $\frac{L^{ISM}(\lambda) - L^{ISM}_{H_2O}(\lambda)}{L^{ISM}(\lambda_{réf}) - L^{ISM}_{H_2O}(\lambda_{réf})} \approx \frac{L(\lambda).T(\lambda)}{L(\lambda_{réf}).T(\lambda_{réf})}$ ce qui est proportionnel à $\frac{R(\lambda)}{R(\lambda_{réf})}$, où R est la réflectance de la cible. Ainsi, le rapport $\log(\frac{CN^{ISM}(\lambda) - CN^{ISM}_{H_2O}(\lambda)}{CN^{ISM}(\lambda_{réf}) - CN^{ISM}_{H_2O}(\lambda_{réf})})$ est donc proportionnel à $\log(\frac{R(\lambda)}{R(\lambda_{réf})})$ si les coefficients d'étalonnage sont égaux aux deux longueurs d'onde. Par la suite, les réflectances $R(\lambda_{réf})$ et $R(\lambda)$ sont simplement notées $R_{réf}$ et R.

II.1.3. Échantillonnage

117 échantillons répartis sur 13 parcelles ont été recueillis durant la campagne AVIRIS en 1991 et 105 échantillons (5 / parcelle) ont été acquis durant la campagne ISM en 1993. Chaque échantillon était constitué d'aiguilles de pin collectées à différents niveaux du couvert. Les échantillons ont été conservés à basse température sur le site avant d'effectuer en laboratoire des analyses spectrales et chimiques pour évaluer leurs concentrations en lignine, cellulose et azote. Dans la mesure où les pins d'une même parcelle ont le même âge et se sont développés dans les mêmes conditions, il a été supposé que les moyennes des mesures des échantillons collectés dans une même parcelle sont représentatives de celle-ci. Les analyses chimiques ont validé cette hypothèse. En moyenne, la gamme de variation des concentrations chimiques au sein d'une même parcelle est inférieure à 4% de la concentration moyenne de la parcelle. De plus, elle représente toujours moins de 10% de la variabilité totale entre toutes les parcelles.

II.1.4. Analyses de laboratoire

II.1.4.1. Analyses chimiques

Les analyses chimiques d'azote (N), lignine (L) et cellulose des échantillons collectés en 1991 et 1993 ont été réalisées par Europ Sol*. L'azote totale a été calculée comme 6.25 fois la concentration de l'azote Kjeldhal (A.O.A.C., 1970), après un traitement des échantillons utilisant l'acide sulfurique. La lignine et la cellulose (Cell S) ont été calculées avec la méthode modifiée de Van Soest et Wine (1968). La cellulose (Cell W) a été déterminée avec la méthode de Weend (Williams et Norris, 1990). En 1991, les estimations des concentrations de Cell S et Cell W se sont avérées être notablement différentes (Gastellu-Etchegorry et al., 1995). Ceci est certainement dû au fait que Cell S et Cell W ne représentent pas exactement les mêmes éléments. De plus, les estimations de concentration réalisées avec des analyses chimiques différentes donnent souvent des résultats différents (Curran, 1989), avec des différences supérieures à 10%.

* Europ Sol est un laboratoire d'analyse de végétaux, Toulouse, France.

	N	L	Cell. W	Cell. S
N	100	-	-	-
L	90 (36)	100	-	-
Cell. W	53 (-63)	56 (-61)	100	-
Cell. S	22	14	47	100
Dynamique des concentrations	0.69 - 1.32 (0.45 - 1.67)	16.3 - 22.5 (9.3 - 21.2)	20.6 - 32.9 (16.1 - 43.4)	21.7 - 30.6

Tableau 4-1: Coefficient de corrélation (%) entre les concentrations, exprimées en pourcentage de matière sèche, d'azote (N), lignine (L) et cellulose (Cell. S - Cell. W) d'aiguilles de pin. Les valeurs de la campagne de 1993 sont entre parenthèses.

Il est apparu des relations entre les concentrations chimiques de la même année. Elles sont relativement importantes et différentes entre 1991 et 1993 (Tableau 4-1). La figure 4-3 illustre l'existence de forte corrélation entre les concentrations chimiques et l'âge des arbres. Il apparaît en particulier, que la concentration en azote des aiguilles tend à diminuer avec l'âge des arbres. En fait, de telles relations auraient plutôt été attendues en fonction de l'âge des aiguilles qu'en fonction de l'âge des arbres.

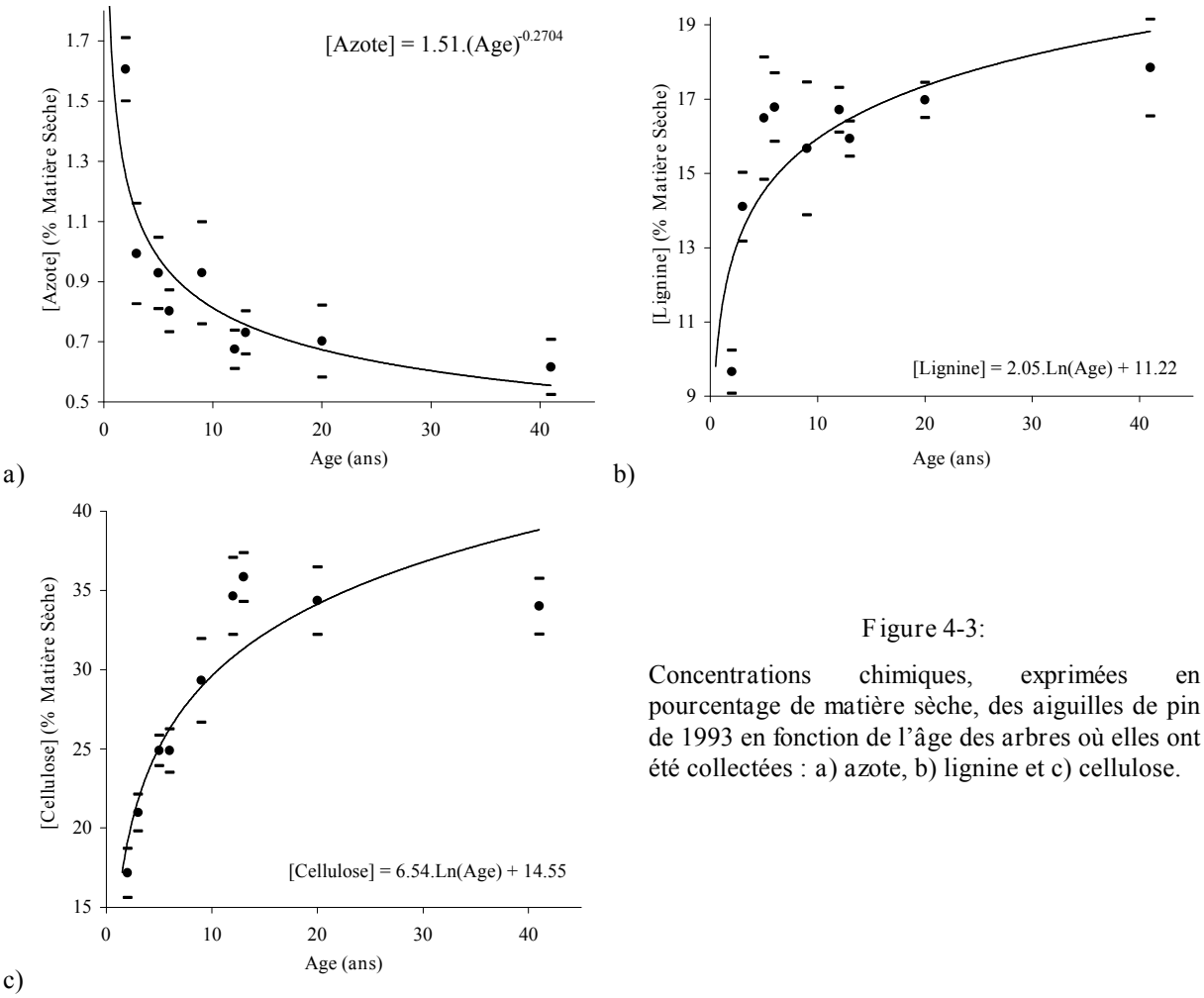


Figure 4-3:

Concentrations chimiques, exprimées en pourcentage de matière sèche, des aiguilles de pin de 1993 en fonction de l'âge des arbres où elles ont été collectées : a) azote, b) lignine et c) cellulose.

II.1.4.2. Mesures spectrales

Tous les échantillons recueillis sur le site ont été séchés et réduits à l'état de poudre ; les grains ayant le plus possible des dimensions semblables. Leurs réflectances ont ensuite été analysées avec deux spectromètres

- un Technicon InfraAlyser 450 (campagne 1991 et 1993): 19 bandes spectrales dans le moyen infrarouge, de 1445 nm à 2348 nm. Ces bandes sont centrées sur les bandes d'absorption majeures des éléments chimiques considérés (Tableau 4-2):

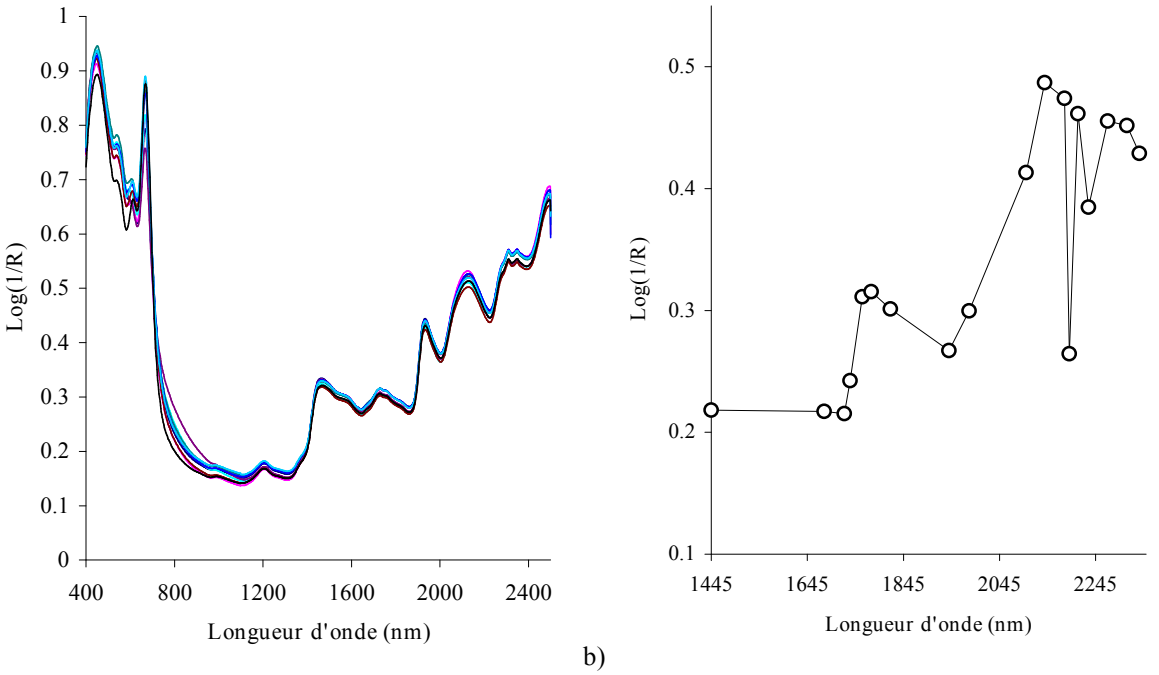
(nm)	Référence	Eau	Amidon	Cellulose	Lignine	Protéines	Lipide	Fibres	Urée	Azote
1445		×								
1680	×									
1722			×	×	×					
1734				×		×				
1759							×			
1778			×	×				×		
1818				×						
1940		×								
1982						×				
2100			×	×						
2139			×			×				
2180						×				
2190			×			×				
2208									×	
2230	×									
2270			×	×	×					
2310							×			
2336				×	×			×		
2348				×						×

Tableau 4-2 : Bandes spectrales du spectromètre Technicon InfraAlyser 450. Les bandes centrées sur des bandes d'absorption d'éléments chimiques sont mentionnés par une croix (×).

Deux rapports ont été calculés $\log(\frac{R}{R_{1680}})$ et $\log(\frac{R}{R_{2230}})$, où R_{1680} et R_{2230} sont les réflectances des bandes de référence centrées respectivement sur 1680 nm et 2230 nm.

- un NIR 6500 System (campagne 1993): 1050 canaux spectraux couvrant le domaine [400 nm 2500 nm]. Le pas d'échantillonnage est de 2 nm et chaque bande spectrale a une largeur de 10 nm. Seules les données entre [800 nm 2500 nm] ont été utilisées car elles correspondent au domaine spectral de l'instrument ISM. Trois rapports ont été calculés $\log(\frac{R}{R_{1040}})$, $\log(\frac{R}{R_{1680}})$ et $\log(\frac{R}{R_{2230}})$ à l'aide des réflectances des trois bandes spectrales de référence 1040 nm, 1680 nm et 2230 nm pour les trois domaines spectraux [800 nm 1420 nm], [1420 nm 1974 nm] et [1974 nm 2500 nm].

La réflectance spectrale hémisphérique totale (R) des échantillons a été enregistrée sous la forme $\log(\frac{1}{R})$, forme proportionnelle à la concentration biochimique si la propagation du rayonnement dans le milieu foliaire suit la loi de Beer-Lambert. De plus, les rapports spectraux ont été choisis pour permettre une comparaison directe avec les acquisitions ISM. Finalement, dans le but d'extrapoler ces résultats de laboratoire au cas de mesures aéroportées seules les bandes spectrales situées dans les fenêtres atmosphériques ont été considérées.



a) b)

Figure 4-4: Spectres d'absorption d'aiguilles de pins séchées et réduites en poudre, mesurés avec deux spectromètres en laboratoire (a) NIR 6500 System et (b)Technicon InfraAlyser 450.

II.2. Équations prédictives établies en laboratoire

L'analyse par régression pas à pas a été appliquée aux spectres de réflectance obtenus en laboratoire dans le but de déterminer les longueurs d'onde et les équations linéaires associées qui sont prédictives des concentrations chimiques. Cette approche statistique détermine de manière automatique des variables optimales, le critère de sélection étant que le carré du coefficient de corrélation multiple (r^2) doit être le plus grand possible. Dans notre cas d'étude, l'inconnue est la concentration chimique et les variables sont les rapports $\log(\frac{R}{R_{réf}})$.

II.2.1. Équations prédictives établies avec le Technicon InfraAlyser 450

Similairement à l'approche de Card et al. (1988), les échantillons sont séparés en 2 groupes pour tester la robustesse des équations prédictives établies. Le premier groupe, « ensemble d'étalonnage », a permis de déterminer des équations prédictives. Ces équations sont appliquées au deuxième groupe « ensemble de prédiction ». Une relation prédictive est considérée comme robuste si le carré du coefficient de corrélation multiple (r^2) est grand et si

le rapport entre l'erreur standard d'étalonnage (SEC[1]) et l'erreur standard de prédiction (SEP[2]) est proche de 1. Il est préférable que l'ensemble d'étalonnage comprenne des échantillons avec une grande dynamique au niveau des concentrations chimiques de manière à ce que les équations prédictives soient les plus générales possibles. La taille des échantillons et la présence de différents constituants au niveau des échantillons (inter-corrélation chimique) peuvent influencer le choix des bandes spectrales.

	$\log(\frac{R}{R_{1680}})$	$\log(\frac{R}{R_{2230}})$
N (1991)	2180*-2270: 94%	2180*-2270: 94% 2190*-2270: 94%
N (1993)	1734*-2336: 67% 1734*-2336-2348*: 76% 1778-2336-1734*: 71%	1778-2336-2348*: 66% 1734*-2336-2348*: 71%
L (1991)	2190-2270*: 76% 1734-1722*-2270*: 79%	2190-2270*: 76%
L (1993)	1982-2336*: 37% 1982-2336*-2348: 48%	1734-2348: 40% 1734-2336*-2348: 50%
Cell W (1991)	1734*-2100*: 58% 1734*-2100*-1982: 74% 1759-2100*: 53% 1759-2100*-2270*: 67%	1734*-1778*: 49% 1734*-1778*-1982: 67% 2270*-2190: 45% 2270*-2190-2139: 59%
Cell W (1993)	1982-2270*: 67% 1982-1759-1778*: 71% 1759-1778*: 69% 1759-1778*-2190: 72% 1722*-1982-2270*: 74%	1982-1759: 66% 1759-1982-2190: 69% 1982-1759-2348*: 71% 2310-1778*: 66% 1759-1778*-2310: 69%

Tableau 4-3: Longueurs d'onde optimales déterminées par régression pas à pas sur les réflectances d'aiguilles de pin obtenues en laboratoire avec le Technicon InfraAlyser 450. Les corrélations (r^2) associées sont indiquées. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec le signe *.

Le tableau 4-3 présente les bandes spectrales sélectionnées à partir des échantillons de 1991 et 1993, et analysés avec le spectromètre Technicon 450. Seules les relations correspondants aux meilleures corrélations sont mentionnées. Les longueurs d'onde associées aux bandes d'absorption du composé sont indexées du symbole « * ». Il apparaît que:

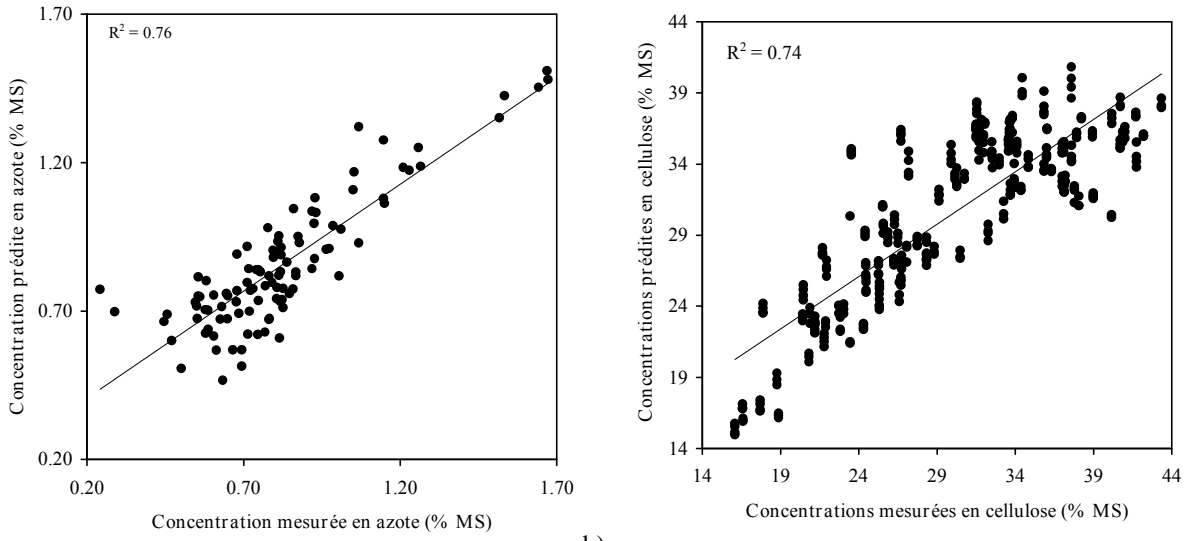
- 2 à 3 longueurs d'onde sont suffisantes pour prédire l'azote, la lignine et la cellulose, avec des corrélations allant respectivement jusqu'à 94% (76%), 79% (50%) et 74% (74%) pour les échantillons de 1991 (1993). La cellulose S a donné lieu à des corrélations plus faibles que la cellulose W (Castellu-Etchegorry et al.,1995).

[1] SEC = $\sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - k + 1}}$ où x_i est la concentration estimée de l'échantillon i, $\bar{x}$ est la concentration moyenne des échantillons, n est le nombre d'échantillons utilisés et k est le nombre de longueurs d'onde.

[2] SEP = $\sqrt{\sum_{1}^{n}\frac{(Y_i - y_i)^2}{n-1}}$ où y_i est la concentration réelle de l'échantillon i, Y_i est la concentration prédite de l'échantillon i et n est le nombre d'échantillons.

- les longueurs d'onde retenues ne sont pas toujours associées à des bandes d'absorption. Ceci est pour partie expliqué par l'inter-corrélation des éléments chimiques. C'est typiquement le cas de la lignine.
- les équations prédictives établies en 1991 et 1993 sont très différentes.

La figure 4-5 montre les relations les plus robustes pour l'azote et la cellulose obtenues avec le Technicon InfraAlyser 450 pour les deux campagnes. Les concentrations réelles et prédites sont exprimées en pourcentage de matière sèche.



a) b)

Figure 4-5: Corrélations (r²) entre les concentrations chimiques réelles et prédites des aiguilles de pins dérivées des mesures effectuées avec le spectromètre Technicon InfraAlyser 450 pendant la campagne de 1991:

$$\text{(a) Azote: [Azote]} = 14\text{-}529.\log\left(\frac{R^{*}_{1734}}{R_{1680}}\right)+214.\log\left(\frac{R_{2336}}{R_{1680}}\right)\text{-}147.\log\left(\frac{R^{*}_{2348}}{R_{1680}}\right)$$

$$\text{(b) Cellulose: [Cellulose]} = 53+604.\log\left(\frac{R_{1982}}{R_{1680}}\right)\text{-}297.\log\left(\frac{R^{*}_{2270}}{R_{1680}}\right)+2042.\log\left(\frac{R^{*}_{1722}}{R_{1680}}\right)$$

II.2.2. Équations prédictives établies avec le NIR 6500

Une étude similaire a été accomplie avec le spectromètre NIR 6500 sur les échantillons recueillis pendant la campagne de 1993. L'analyse des mesures du NIR 6500 a été réalisée avec le logiciel ISI (Shenk et Westerhaus, 1991). Seuls, 4 échantillons aberrants ont été éliminés de l'analyse. Des analyses par régression ont tout d'abord été appliquées aux données brutes comme pour le Technicon, puis aux données prétraitées. Le prétraitement des données a consisté en une normalisation (SNV) suivie d'une égalisation des données. La première transformation correspond à (Barnes et al., 1989) :

$$SNV_k(\lambda) = \frac{x_k(\lambda) - \bar{x}_k}{\sqrt{\frac{\sum (x_k(\lambda) - \bar{x}_k)^2}{N-1}}}, \text{ où}$$

où $SNV_k(\lambda)$ est la variation standard normale de l'échantillon k à la longueur d'onde λ, $x_k(\lambda)$ correspond au rapport logarithmique des réflectances $\log\left(\frac{R}{R_{réf}}\right)$ de l'échantillon k et $\bar{x}_k$ est la

moyenne de $x_k(\lambda)$ sur N longueurs d'onde. Cette approche minimise la variabilité de la mesure induite par la différence de taille des grains des poudres, dans la mesure où une différence de taille des grains induit un biais systématique à toutes les longueurs d'onde. L'égalisation permet de prendre en compte les décalages spectraux instrumentaux.

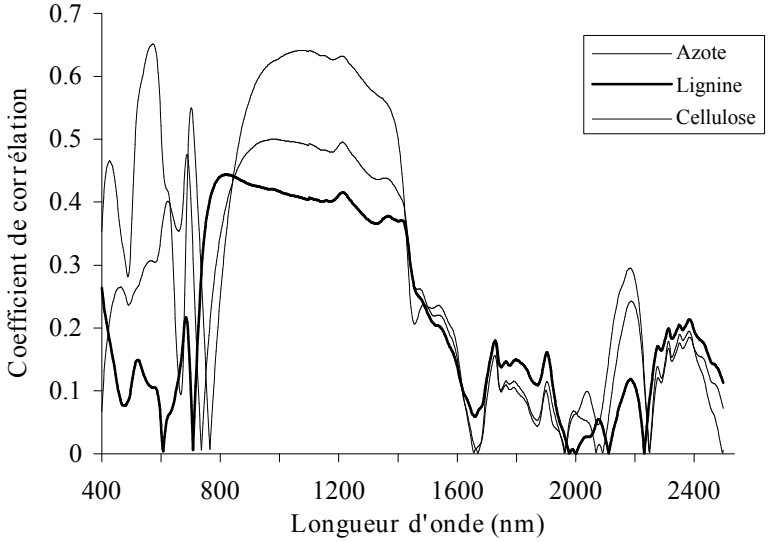


Figure 4-6:

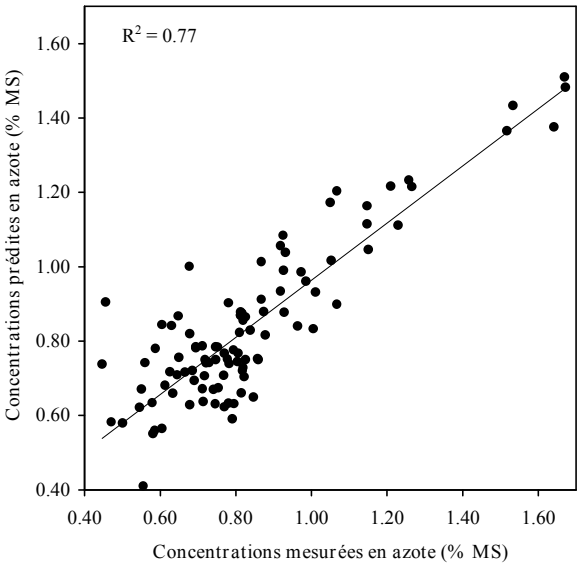
Corrélogramme (r) entre les bandes spectrales de l'instrument NIR 6500 System et les composés chimiques.

	Longueur d'onde (nm)	r^2 (%): 95% [r^2_{min} r^2_{max}]	Traitement
Cell W	1234/1782*/2200*	76 [68 84]	non
	1526/2386/2442	77 [68 84]	non
	800/1036/2360*	81 [73 87]	non
	1552/2398/2400	85 [79 90]	SNV + Égalisation
N	1490*/1498*/2194*	69 [59 79]	non
	1668/1746/2208	77 [67 85]	non
L	800/1684*/2206	61 [46 71]	non
	800/2114/2390	58 [38 67]	SNV + Égalisation

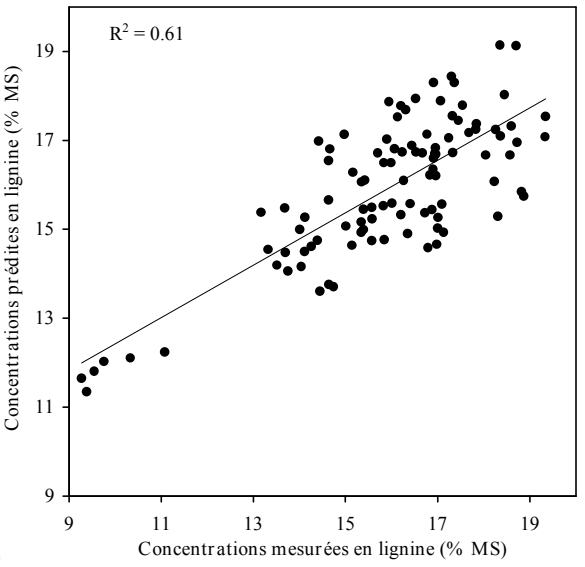
Tableau 4-4: Longueurs d'onde optimales et corrélations (r^2) associées (intervalle de confiance de 95%) pour les mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 Système pendant la campagne de 1993. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec le signe*.

Le tableau 4-4 indique les longueurs d'onde des équations prédictives optimales. Le rapport « SEC/SEP » est toujours proche de 1. Il apparaît que :

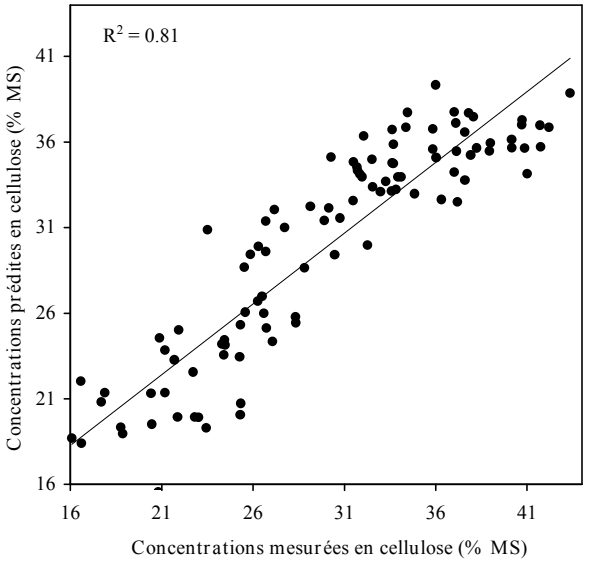
- 3 longueurs d'onde sont suffisantes pour prédire les concentrations d'azote et cellulose avec des corrélations (r^2) supérieures à 69%. Les résultats sont beaucoup moins bons pour la lignine, comme dans le cas du Technicon. La figure 4-6 présente les corrélations entre les bandes spectrales et les composés chimiques.
- les équations prédictives n'utilisent pas toujours des bandes spectrales associées aux bandes d'absorption des éléments considérés.
- les pré-traitements, c'est à dire SNV et égalisation, ont peu amélioré les corrélations.
- les corrélations extrêmes associées à un intervalle de confiance de 95% sont en général comprises dans un intervalle de ± 5%, excepté pour la lignine qui a une limite inférieure beaucoup plus faible.



a)



b)



c)

Figure 4-7:

Corrélations (r^2) entre les concentrations chimiques réelles et prédites des aiguilles de pins dérivées des mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 System pendant la campagne de 1993:

$$\text{(a) Azote: } [\text{Azote}] = 2 + 715.\log\left(\frac{R^*_{1490}}{R_{1680}}\right) - 718.\log\left(\frac{R^*_{1498}}{R_{1680}}\right) - 33.\log\left(\frac{R^*_{2194}}{R_{2230}}\right)$$

$$\text{(b) Lignine: } [\text{Lignine}] = 21 + 856.\log\left(\frac{R_{2206}}{R_{2230}}\right) - 74.\log\left(\frac{R_{800}}{R_{1040}}\right) + 3244.\log\left(\frac{R^*_{1684}}{R_{1680}}\right)$$

$$\text{(c) Cellulose: } [\text{Cellulose}] = 41 + 1250.\log\left(\frac{R^*_{2360}}{R_{2230}}\right) - 25607.\log\left(\frac{R_{1036}}{R_{1040}}\right) + 304.\log\left(\frac{R_{800}}{R_{1040}}\right)$$

La figure 4-7 présente les meilleures relations pour l'évaluation des concentrations en azote ($r^2 = 77\%$), lignine ($r^2 = 61\%$) et cellulose ($r^2 = 81\%$) exprimées en %MS.

Cette étude met en évidence que les équations prédictives établies à partir des échantillons de 1993 avec le Technicon InfraAlyser et le NIR 6500 sont très différentes. Les corrélations obtenues avec le NIR 6500 sont nettement meilleures, en particulier pour la lignine et la cellulose. Ceci peut être expliqué par la disponibilité d'un plus grand nombre de bandes spectrales avec le spectromètre NIR 6500, qui peuvent être mieux adaptées aux caractéristiques d'absorption des éléments étudiés. De plus, les 2 spectromètres donnent des réponses spectrales notablement différentes aux mêmes longueurs d'onde.

Le tableau 4-5 illustre cet aspect à partir du calcul systématique des corrélations (r) entre les mesures spectrales du NIR 6500 System et du Technicon InfraAlyser 450 pour tous les échantillons recueillis au cours de la campagne 1993 (Pinel et al., 1994). Ces corrélations varient entre 42% pour la bande 2230nm et 82% pour les bandes 1722nm et 1734 nm.

Longueur d'onde (nm)	r (%)	Longueur d'onde (nm)	r (%)
1680	77	2180	59
1722	82	2190	75
1734	82	2208	71
1759	77	2230	42
1778	71	2270	80
1982	72	2310	81
2100	49	2336	74
2139	63	2348	74

Tableau 4-5: Corrélations (r) entre les mesures spectrales effectuées avec le NIR 6500 System et le Technicon InfraAlyser 450 pour tous les échantillons collectés sur le terrain durant la campagne 1993.

Compte tenu du niveau d'imprécision des analyses chimiques généralement observé, nous avons développé une troisième approche (Pinel et al., 1994) avec les échantillons de 1993. Elle consiste tout d'abord à calculer des « pseudo-concentrations chimiques » à partir des mesures du NIR 6500 combinées à des équations prédictives supposées robustes déjà obtenues en laboratoire avec d'autres échantillons (Meuret et al., 1993). Les relations utilisées ont été établies en combinant une méthode des moindres carrés et une décomposition en composantes principales. Une fois les pseudo-concentrations calculées, une régression pas à pas a permis de déterminer de nouvelles équations prédictives (Tableau 4-6) à partir d'un nombre de mesures spectrales beaucoup plus restreint que celui utilisé pour la détermination des pseudo-concentrations. Dans ce travail, le domaine spectral utile pour l'observation de la Terre depuis l'espace a uniquement était considéré, c'est à dire les fenêtres atmosphériques, avec adaptation au cas des données ISM (λ > 800 nm).

	Longueur d'onde (nm)	r^2 (%): 95% [r^2_{min} r^2_{max}]	Traitement
Cell W	828/998/2194	78 [68 84]	prédiction des concentrations
N	2194*/2118/1666	85 [78 90]	prédiction des concentrations
	2196*/2114/1670	86 [78 90]	
L	2220/1666*/1072	91 [87 94]	prédiction des concentrations
	1674*/1082/2210	93 [90 95]	

Tableau 4-6: Longueurs d'onde optimales (nm) et corrélations (r^2) associées (intervalle de confiance de 95%) pour les mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 Système et les concentrations chimiques prédites à partir de relations déjà existantes pendant la campagne de 1993. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec le signe*.

Il est apparu de faibles corrélations entre les concentrations réelles et les pseudo-concentrations: 80% pour la cellulose, 62% pour la lignine excepté pour l'azote (92%). Cette approche illustre la difficulté d'établir des correspondances robustes entre mesures spectrales et analyses chimiques. Ainsi, il est généralement admis que les résultats obtenus avec des

analyses chimiques effectuées avec des méthodes différentes ou dans des conditions non similaires présentent une grande dispersion. Le faible coefficient de corrélation (62%) obtenu pour la lignine est certainement lié à la difficulté d'isoler chimiquement cet élément. Les équations prédictives établies à partir des pseudo-concentrations donnent de meilleures corrélations (r^2) en particulier pour l'azote ($r^2 = 77\% \rightarrow r^2 = 86\%$) et la lignine ($r^2 = 61\% \rightarrow r^2 = 93\%$). Le degré de cohérence de ces relations n'est cependant pas établi.

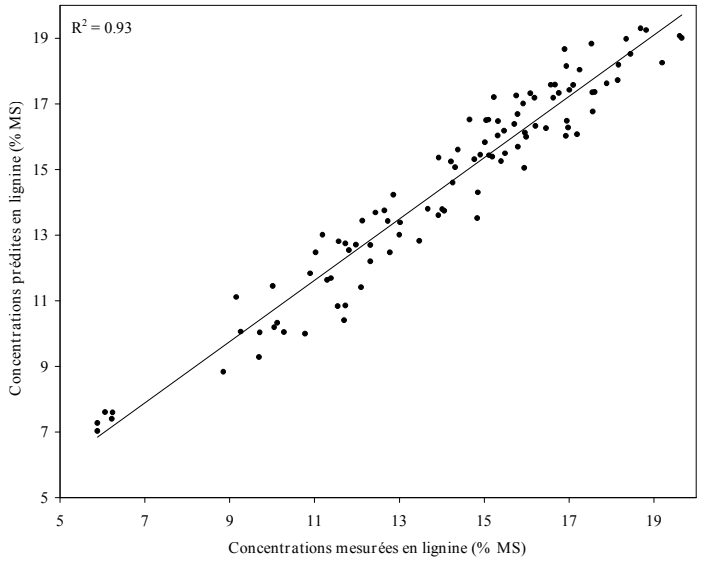


Figure 4-8:

Corrélation (r^2) entre la concentration chimique en lignine réelle et prédite des aiguilles de pins dérivées de mesures effectuées avec le spectromètre NIR 6500 System pendant la campagne de 1993. En fait, les concentrations réelles sont prédites à l'aide d'équations pré-établies et supposées exactes.

$$[\text{Lignine}] = 17 + 1317.\log\left(\frac{R_{2210}}{R_{2230}}\right) - 2592.\log\left(\frac{R^*_{1674}}{R_{1680}}\right) + 703.\log\left(\frac{R_{1082}}{R_{1040}}\right)$$

II.3. Validation des équations prédictives avec les mesures aéroportées

Le petit nombre de parcelles échantillonnées durant les campagnes de 1991 et 1993 est indiscutablement un facteur limitatif pour conduire des analyses de régression pas à pas entre les mesures spectrométriques aéroportées et les concentrations chimiques. En conséquence, notre approche a consisté à étudier la possibilité d'extrapoler des équations prédictives établies en laboratoire au niveau aéroporté.

II.3.1. Extrapolation aux mesures AVIRIS

Les données AVIRIS ont été géoréférencées avec des données auxiliaires (limites de parcelles, âge des arbres de chaque parcelle, etc.), pour croiser les différents plans d'informations disponibles. Cette approche a été réalisée pour les 13 parcelles échantillonnées pour les données corrigées ou non des effets atmosphériques. Les équations prédictives établies en laboratoire ont ensuite été appliquées aux données AVIRIS. Il est apparu que:

- les corrélations ne sont pas très élevées. Les plus forts coefficients de corrélation (r^2) ont été obtenus avec l'azote ($r^2 = 55\%$) et la cellulose ($r^2 = 63\%$). Les corrélations sont beaucoup plus faibles pour la lignine ($r^2 = 30\%$). Ces résultats n'ont pas été améliorés en pondérant les concentrations chimiques foliaires par la biomasse foliaire locale. Ceci peut être dû au fait que la réflectance des couverts ne résulte pas uniquement des propriétés optiques foliaires mais aussi de paramètres tels que leurs distributions spatiale et angulaire. Cette remarque concorde avec le fait que de bonnes corrélations ont été obtenues en laboratoire pour l'azote dans le cas

d'éléments foliaires réduits à l'état de poudre, alors que pour des mesures réalisées sur l'ensemble du couvert les corrélations sont beaucoup plus faibles.

- l'utilisation de corrections atmosphériques n'a pas amélioré les résultats: azote ($r^2 = 53\%$), cellulose ($r^2 = 61\%$) et lignine ($r^2 = 19\%$). Ceci peut s'expliquer par une distribution homogène de l'atmosphère sur toutes les parcelles échantillonnées.

II.3.2 Extrapolation aux données ISM

Les termes $\log(\frac{R^{ISM}}{R^{ISM}_{réf}})$ ont été calculés pour toutes les parcelles échantillonnées et pour chaque axe de vol ISM. Six parcelles parmi 21 échantillonnées ont été écartées car elles ne comportaient pas suffisamment de pixels. Les équations prédictives établies en laboratoire à partir des deux spectromètres ont été appliquées aux données ISM. En fonction du spectromètre de laboratoire utilisé, les résultats d'extrapolation sont différents. Comparativement aux résultats obtenus avec les données AVIRIS, des résultats similaires ont été obtenus avec l'application des équations prédictives établies en laboratoire avec le spectromètre Technicon InfraAlyser 450 aux données ISM brutes: $r^2 = 76\%$ pour la cellulose, $r^2 = 73\%$ pour l'azote et $r^2 = 61\%$ pour la lignine (Pinel et al., 1994).

Dans le cas de l'application des équations prédictives établies avec le spectromètre NIR 6500 System, les concentrations chimiques réelles et prédites sont peu corrélées. En effet, alors que des résultats encourageants ont été obtenus pour l'azote ($r^2 = 66\%$), les corrélations sont systématiquement beaucoup plus faibles pour la lignine et la cellulose. L'application de corrections atmosphériques a cependant apporté certaines améliorations, selon les équations prédictives utilisées:

- azote : les corrélations (r^2) sont améliorées jusqu'à 74% et 76% avec les équations établies respectivement avec le Technicon et le NIR 6500.
- lignine : les corrélations (r^2) restent faibles ($r^2 < 35\%$) avec les équations prédictives dérivées du Technicon et sont améliorées jusqu'à $r^2 = 59\%$ avec les équations dérivées du NIR 6500.
- cellulose : les corrélations restent faibles ($r^2 < 29\%$) pour le NIR 6500, mais sont améliorées jusqu'à 76% avec le Technicon.

	Longueur d'onde (nm)	r^2 (%): 95% [r^2_{min} r^2_{max}]	Traitement
Cell W	1234/1782*/2200*	29	non
N	1490*/1498*/2194*	76 [40-91]	non
	1668/1746/2208	64 [25-86]	non
	1670/2114/2196*	58 [42-68]	pseudo concentration
	1666/2118/2194*	76 [58-90]	pseudo concentration
L	800/1684*/2206	59 [16-86]	non
	800/2114/2390	52 [14-77]	SNV + Égalisation
	1082/1674*/2210	77 [62-92]	pseudo concentration
	1072/1666*/2220	77 [46-90]	pseudo concentration

Tableau 4-7: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% résultant de l'application des équations prédictives établies en laboratoire avec le NIR 6500 sur les spectres ISM partiellement corrigés des effets atmosphériques. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption sont repérées avec *.

Il apparaît (Tableau 4-7) donc que l'extrapolation de certaines équations prédictives de laboratoire établies sans pré-traitement n'induit pas de dégradation trop importante des coefficients de corrélation. Cependant, les intervalles de confiance à 95% ont été très agrandis en particulier pour la limite inférieure. Ceci peut être expliqué par le faible nombre de parcelles qui ont été survolées par le capteur ISM. On remarque également que l'utilisation des équations prédictives établies avec la méthode des « pseudo-concentrations chimiques » n'a finalement pas conduit à de meilleures prédictions (Tableau 4-7) si ce n'est pour la lignine (Fig. 4-9b). Ce mauvais résultat peut simplement être lié au fait que les équations prédictives utilisées pour le calcul de ces "pseudo-concentrations" ont été établies dans des conditions différentes de celles de notre étude (type d'aiguilles de pins, stade phénologique, etc.).

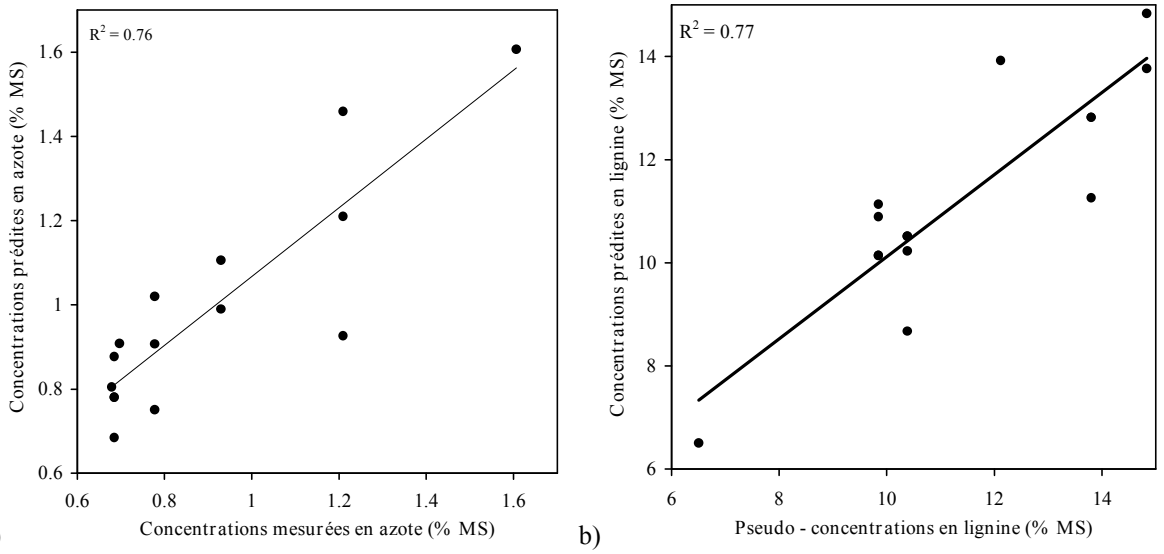


Figure 4-9: Corrélations (r^2) entre les concentrations ou les pseudo-concentrations chimiques mesurées en laboratoire et les spectres ISM partiellement corrigés des effets atmosphériques:

$$\text{(a) Azote: [Azote]} = 2 + 715.\log\left(\frac{R^*_{1490}}{R_{1680}}\right) - 718.\log\left(\frac{R^*_{1498}}{R_{1680}}\right) - 33.\log\left(\frac{R^*_{2194}}{R_{2230}}\right)$$

$$\text{(b) Lignine: [Lignine]} = 17 + 1317.\log\left(\frac{R_{2210}}{R_{2230}}\right) - 2592.\log\left(\frac{R^*_{1674}}{R_{1680}}\right) + 703.\log\left(\frac{R_{1082}}{R_{1040}}\right)$$

De même que dans le cas de l'étude avec les données AVIRIS le relativement faible nombre de parcelles échantillonnées a été une contrainte sérieuse. Cette dernière a de plus été amplifiée du fait que l'instrument n'est pas un vrai spectromètre imageur. Ainsi, les problèmes de co-registration des données ont impliqué le rejet de quelques parcelles.

Les différents niveaux de prévision des équations prédictives dérivées du Technicon et du NIR 6500 sont bien évidemment surprenants. Ceci s'explique peut-être par le fait que ces équations ne sont pas établies avec les mêmes jeux de longueurs d'onde. De plus, ces différences sont très certainement liées aux faibles corrélations obtenues entre les mesures de réflectance de laboratoire ; c'est à dire différentes conditions expérimentales de mesure.

II.4. Analyses des résultats et conclusion partielle

Deux campagnes aéroportées (AVIRIS: 1991 et ISM: 1993) combinées à la collecte d'échantillons d'aiguilles de pins, ont été organisées au-dessus d'un même site des Landes. Les analyses chimiques et les mesures spectrales d'aiguilles de pins, réalisées en laboratoire, nous ont permis d'établir des équations prédictives des concentrations en lignine, azote et

cellulose. Les mesures spectrales ont été effectuées avec 2 spectromètres: un Technicon InfraAlyser 450 (1991 et 1993) et un NIR 6500 System (1993). L'utilisation d'échantillons prélevés sur le même site à 2 ans d'intervalle a conduit à l'obtention d'équations prédictives différentes. D'autre part, l'utilisation du même jeu d'échantillons avec 2 spectromètres différents a aussi conduit à des équations différentes. De plus, les équations diffèrent également en fonction du type de pré-traitements appliqués aux données. Ces remarques illustrent la difficulté d'établir des équations prédictives qui sont à la fois précises et générales. Cependant, de fortes corrélations (r^2) ont été obtenues entre les concentrations chimiques réelles et prédites pour l'azote (r^2 = 94% et 77%), la lignine (r^2 = 79% et 61%) et la cellulose (r^2 = 74% et 81%) sans pré-traitement respectivement en 1991 et 1993. De plus, nous avons testé avec les données de 1993 la possibilité d'utiliser des équations prédictives pré-établies à partir d'un grand nombre de longueurs d'onde. Cette approche a permis d'améliorer sensiblement des corrélations (r^2) pour l'azote (86%) et la lignine (93%).

Les équations prédictives établies en laboratoire ont été extrapolées au cas des couverts, à l'aide des données spectrométriques aéroportées AVIRIS et ISM. Cette extrapolation a conduit à des corrélations assez faibles entre les concentrations réelles et simulées à partir des mesures AVIRIS: r^2 = 55% pour l'azote, r^2 = 63% pour la cellulose et seulement r^2 = 30% pour la lignine. L'utilisation de corrections atmosphériques n'a pas réellement amélioré les résultats. D'une manière générale, en combinant les équations prédictives établies avec les 2 spectromètres de laboratoire, de meilleurs résultats ont été obtenu à l'aide des données ISM: r^2 = 76% pour l'azote, r^2 = 59% pour la lignine et r^2 = 76% pour la cellulose. L'explication réside certainement dans le fait que le spectromètre ISM a un meilleur rapport signal sur bruit qu'AVIRIS dans le moyen infrarouge. Dans les 2 cas d'étude, le faible nombre de parcelles échantillonnées a été une contrainte sérieuse. Cette contrainte a été amplifiée avec l'instrument ISM car ce celui-ci n'est pas un vrai spectromètre imageur.

Les quelques résultats encourageants obtenus ne nous ont pas permis de statuer de manière sure quant au potentiel de la haute résolution spectrale pour étudier la chimie des couverts. Il convient de rester très prudent. Ainsi, les équations prédictives ont été établies à partir d'éléments foliaires séchés et réduits à l'état de poudre. Il conviendrait de travailler avec des éléments foliaires frais « intacts » (non réduits à l'état de poudre) car ceux-ci constituent les surfaces directement observées par télédétection. D'autre part, la forte absorption de l'eau foliaire risque de masquer la détection de composés biochimiques pourtant facilement détectables sur des poudres séchées. Ces contraintes expliquent certainement pourquoi les études déjà menées sur ce sujet (Martin et Aber, 1990 ; Curran et al., 1992) n'ont pas permis de dégager des équations prédictives indépendantes du site d'étude, de la date de prélèvement des échantillons, etc.

Compte tenu de l'importance de la chimie des couverts pour modéliser les processus des écosystèmes forestiers tels que la photosynthèse, la productivité primaire nette, etc., il est donc encore nécessaire de conduire des études « systématiques » sur des sites très bien connus. De plus, le nombre d'échantillons doit être suffisamment important pour ne pas limiter l'étude à la simple extrapolation d'équations prédictives de laboratoire, mais pour permettre l'établissement de telles relations directement à partir de mesures du couvert. Un problème majeur est bien évidemment celui de la validité et de la robustesse des relations obtenues. Ce problème souligne l'intérêt de coupler les études spectrométriques semi-empiriques avec des travaux de modélisation afin de pouvoir étudier de manière certes théorique mais quantitative, le potentiel de la haute résolution spectrale tout en prenant en compte des « bruits » expérimentaux tels que l'atmosphère, l'architecture des couverts, les conditions de prise de prise de vue, etc. Un exemple d'approche est présenté dans la deuxième partie de ce chapitre.

III. APPROCHE MODELISATION POUR L'EVALUATION DU POTENTIEL DE LA HAUTE RESOLUTION SPECTRALE

Le but de cette étude est avant tout de montrer l'intérêt de la modélisation du transfert radiatif dans les couverts pour tester la robustesse des équations prédictives « spectrométriques ». La modélisation permet en effet d'évaluer la sensibilité de l'information spectrométrique aéroportée ou spatiale aux paramètres structuraux de la végétation et aux conditions d'observation du couvert. Elle constitue donc un outil privilégié pour mener des études « systématiques» à l'inverse des expériences aéroportées.

L'approche développée ici a été conduite avec deux modèles de transfert radiatif:

- au niveau foliaire: le modèle PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990 ; Fourty et al., 1996) présenté brièvement dans l'annexe 2. Il permet de simuler à partir d'un paramètre structural foliaire et des concentrations de différents éléments biochimiques de la feuille (chlorophylle, lignine, protéines, etc.), la réflectance et la transmittance foliaire dans le domaine spectral [400-2400 nm].
- au niveau de la canopée: le modèle DART (Gastellu-Etchegorry et al., 1994) présenté dans le chapitre 2.

Les éléments biochimiques recherchés sont la lignine, la cellulose et les protéines. Leurs caractéristiques spectrales spécifiques étant essentiellement dans le moyen infrarouge, cette étude est donc limitée au domaine spectral [1300-2400 nm].

L'approche est décomposée en 3 étapes majeures:

- Simulations DART de la réflectance d'une parcelle de pins, dite de référence, pour différentes concentrations des éléments biochimiques considérés.
- Établissement d'équations prédictives des concentrations biochimiques par régression, à partir des simulations DART.
- Évaluation de la robustesse de ces équations prédictives sur des simulations DART de réflectance de parcelles « variables ». Le mot « variable » est employé dans le sens où les paramètres structuraux de la parcelle changent.

III.1. Simulations DART d'une maquette de référence

III.1.1. Architecture de la maquette

Les simulations DART ont été réalisées avec une maquette dite « de référence », supposée représenter une parcelle « moyenne » de pins maritimes des Landes. Les caractéristiques biophysiques des arbres sont:

- hauteur des arbres: H = 10.5 m (6.0m pour le tronc et 4.5m pour le houppier),
- diamètre des troncs: $\varnothing_{tronc}$ = 15 cm,
- couronne de forme ellipsoïdale de section horizontale circulaire de rayon $\varnothing$ = 4.5 m.
- éléments foliaires distribués de manière sphérique (LAD),
- indice foliaire de la parcelle LAI = 2.5,
- espacement moyen entre les arbres Δr = 6 m.

Le sous-bois comprend un sol de sable clair lambertien et une couche de végétation très variable (faible ou forte densité de végétation), ce qui induit une forte variabilité spectrale. Le caractère répétitif de la plantation a permis de simuler l'ensemble de la parcelle à partir d'un motif générique composé de 4 arbres uniquement (Fig. 4-10). Le taux de couverture est égal dans cette configuration à 47.9%. La configuration d'illumination solaire est celle de la campagne ISM: θ_s = 31.48° et ϕ_s = 148° [(1)] . L'éclairement atmosphérique a été négligé compte tenu des longueurs d'onde utilisées.

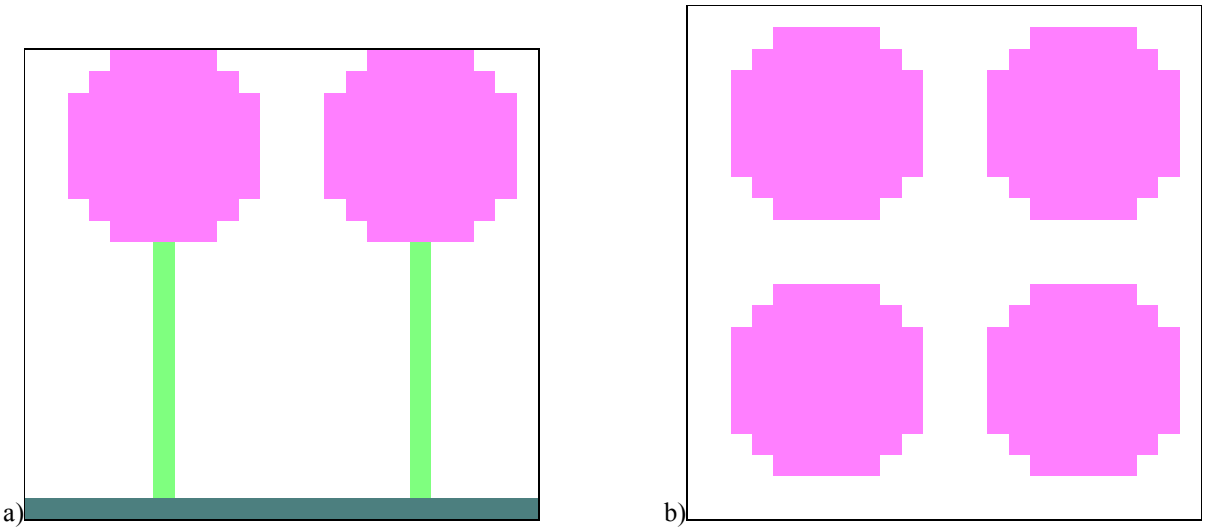


Figure 4-10: Représentation schématique de la maquette de référence utilisée pour les simulations DART: a) profil vertical et b) profil horizontal.

III.1.2. Propriétés optiques $\omega_f \equiv (\rho_f, \tau_f)$ foliaires et ρ_{sb} du sous-bois

Les analyses chimiques effectuées sur les aiguilles de pins au cours de la campagne ISM en 1993, ont fourni la dynamique des concentrations des éléments biochimiques (Tableau 4-1). Le modèle PROSPECT utilise ces concentrations pour simuler les spectres de réflectances et transmittances foliaires (Fig. 4-11) qui, dans un deuxième temps, servent à calculer les fonctions de phase des cellules «feuille» pour le modèle DART.

L'objectif est donc de déterminer des spectres de réflectance du couvert pour N_λ longueurs d'onde entre [1300 2400 nm], et N_{Lig}, N_N et N_{Cell} concentrations en lignine, azote et cellulose. Ceci correspond en tout à $N_\lambda.N_{Lig}.N_N.N_{Cell}$ simulations, soit de l'ordre de 10^5 simulations si le pas d'échantillonnage spectral est de 10 nm et si l'on considère 10 niveaux de concentrations pour chaque composé chimique. Ce nombre de simulations étant quasi impossible à réaliser dans des délais convenables, une autre approche a été adoptée.

Il a été utilisé le fait que le couvert a des propriétés optiques foliaires (ρ_f,τ_f) identiques ou très voisines à différentes longueurs d'onde. Ainsi, le couple $(\rho_f,\tau_f) \approx (0.2, 0.2)$ correspond à 3 simulations à λ = 1400 nm, λ = 1500 nm et λ = 1870 nm si C_{Cell} = 15% de MS* et à λ = 1420 nm, λ = 1480 nm et λ = 1870 nm si C_{Cell} = 45% de MS* (Fig. 4-11). Cette constatation permet de minimiser le nombre de simulations DART pour couvrir l'ensemble des longueurs d'onde moyen infrarouge et des niveaux de concentrations biochimiques.

---

(1) Les angles solaires équivalents utilisés avec le modèle DART sont θ_s = 148.52° et ϕ_s = 222° (cf. chapitre 3). Dans la suite du texte, les angles d'illumination et d'observation mentionnés sont les angles pour DART.

* MS: abréviation de «matière sèche».

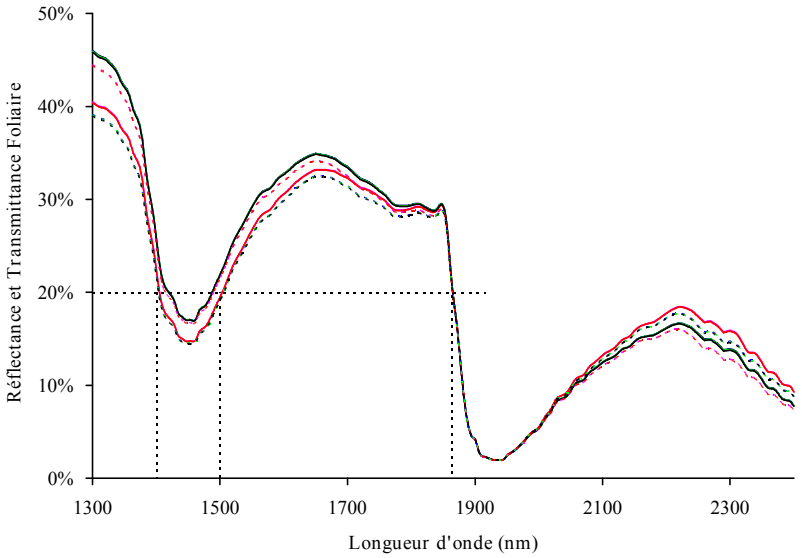


Figure 4-11:

Spectres de réflectances ( ) et transmittances (--) foliaires simulés avec le modèle PROSPECT pour des concentrations en cellulose variant de 15 à 45% de matière sèche (MS).

N=2.1, Eau=0.0125 cm, MS=0.0083 g/cm², C_{Chl}=50 µg/cm², C_{Lig}=15% MS, C_{Prot}=7% MS, C_{Amidon}=20% MS, $C_{HémiCell}$=1% MS, C_{Sucre}=1% MS.

Notre objectif consiste à déterminer la base de données de couples de réflectances et transmittances foliaires la plus petite possible (c'est à dire en évitant de mentionner 2, 3, etc. fois un couple correspondant à plusieurs longueurs d'onde), associée aux variations des dynamiques de concentrations des éléments biochimiques de manière à minimiser les simulations DART au niveau du couvert. Cette base de données des couples (ρ_{fi},τ_{fi}) est obtenue en appliquant l'algorithme suivant:

- Simulations PROSPECT de N spectres ($\lambda \in [1300\ 2400]$; $\Delta\lambda = 2$ nm) de réflectances ρ_f et transmittances τ_f foliaires associés à N concentrations d'un premier composé biochimique, par exemple la lignine, couvrant l'intervalle de variation du composé. Dans notre cas, N est égal à 30.
- Détermination d'une base préliminaire (ρ_f,τ_f) telle que pour tout (ρ_f,τ_f) il existe (ρ_{fi},τ_{fi}) avec $\left|\frac{(\quad - \quad_{fi})}{\quad_{fi}}\right| + \left|\frac{(\quad - \quad_{fi})}{\quad_{fi}}\right| < 1\%$. Cette condition permet d'assurer la détermination d'une base homogène de couples de réflectances et de transmittances.
- Ajout des couples (ρ_f,τ_f) à la base de données de manière à ce qu'elle soit aussi adaptée aux variations de concentrations des autres éléments biochimiques (protéines et cellulose).

Les domaines spectraux [1400 1490 nm] et [1890 1980 nm] ne sont pas pris en compte car ils correspondent à de fortes absorptions de l'eau (foliaire et atmosphérique).

L'analyse des simulations DART a permis de constater que l'ensemble des couples (ρ_f,τ_f) de même albédo foliaire ω_f ($\omega_f = \rho_f + \tau_f$) donne des réflectances du couvert $R(\omega_f)$ identiques. Ce résultat est dû au fait que la distribution angulaire foliaire est sphérique et que les réflectances et transmittances foliaires sont en général similaires. Cette constatation a donc permis de réduire également le nombre de simulations DART.

Cette simplification est évidemment valable dans le cas où tous les autres paramètres du couvert sont constants. 450 valeurs de ω_f entre 0 et 90% par pas de 0.2% ont été considérés. Cependant, même si la structure du couvert ne varie pas, un autre paramètre variable à considérer est la réflectance du sous-bois ρ_{sb}. Le terme ρ_{sb} représente ici la réflectance lambertienne équivalente du sous-bois égale à la réflectance hémisphérique de ce milieu. Les

simulations DART ont donc été effectuées avec ρ_{sb} variant entre 0 et 45% par pas de 5%. La variation spectrale de ρ_{sb} permet de simuler différents types de surface (sol nu, sous-bois, etc.). Ceci a conduit à une base de données comportant 4500 réflectances du couvert $R(\omega_f,\rho_{sb},\Omega_s)$ pour toute direction d'observation (Ω_v), c'est à dire 107 directions. La figure 4-12 présente la base de donnée des simulations $R(\omega_f,\rho_{sb},\Omega_s)$ pour trois directions de visée: nadir, oblique (θ_v = 31.42° et ϕ_v = 102°) et rétrodiffusion (θ_v = 31.42° et ϕ_v = 222°). Les différentes courbes de chaque graphique correspondent à des réflectances de sous-bois ρ_{sb} différentes. Chaque courbe peut être ajustée très fidèlement (r^2>99.99%) à un polynôme de degré 4. Dans le cas d'une visée à la verticale, les équations des courbes de tendance sont:

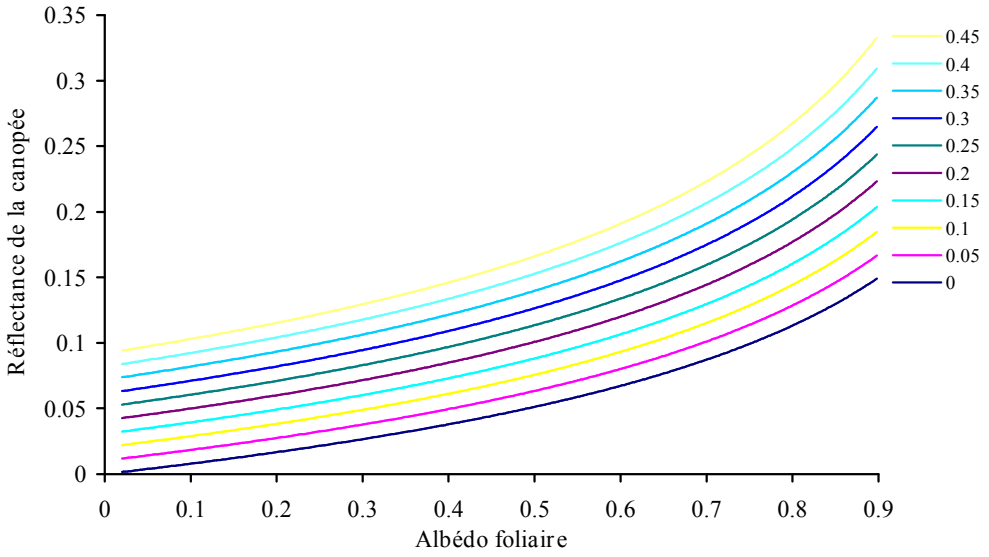
$$\begin{cases}
R(\omega_f, \rho_{sb}=0\%) = 0.2211*\omega_f^4 - 0.2298*\omega_f^3 + 0.1473*\omega_f^2 + 0.057*\omega_f + 0.0008 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=5\%) = 0.2404*\omega_f^4 - 0.2516*\omega_f^3 + 0.1593*\omega_f^2 + 0.0578*\omega_f + 0.011 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=10\%) = 0.2629*\omega_f^4 - 0.2775*\omega_f^3 + 0.1735*\omega_f^2 + 0.0583*\omega_f + 0.0214 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=15\%) = 0.2887*\omega_f^4 - 0.3076*\omega_f^3 + 0.1898*\omega_f^2 + 0.0587*\omega_f + 0.0317 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=20\%) = 0.3183*\omega_f^4 - 0.3425*\omega_f^3 + 0.2083*\omega_f^2 + 0.0589*\omega_f + 0.0421 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=25\%) = 0.3503*\omega_f^4 - 0.3799*\omega_f^3 + 0.2282*\omega_f^2 + 0.0592*\omega_f + 0.0524 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=30\%) = 0.3842*\omega_f^4 - 0.4193*\omega_f^3 + 0.2491*\omega_f^2 + 0.0594*\omega_f + 0.0628 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=35\%) = 0.4216*\omega_f^4 - 0.4629*\omega_f^3 + 0.2722*\omega_f^2 + 0.0596*\omega_f + 0.0733 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=40\%) = 0.4609*\omega_f^4 - 0.5088*\omega_f^3 + 0.2963*\omega_f^2 + 0.0596*\omega_f + 0.0835 \\
R(\omega_f, \rho_{sb}=45\%) = 0.5048*\omega_f^4 - 0.5603*\omega_f^3 + 0.3223*\omega_f^2 + 0.0595*\omega_f + 0.0939
\end{cases}$$

Il a été vérifié qu'un nombre beaucoup plus limité de simulations aurait été suffisant pour obtenir les mêmes équations de tendance avec un ajustement (r^2) aussi satisfaisant. D'autre part, sur des paysages similaires où seules quelques caractéristiques biophysiques sont modifiées, nous avons également vérifié que la réflectance du couvert peut être ajustée avec un polynôme d'ordre 4. Ces constatations ont été utilisées dans la deuxième partie de cette étude pour simuler la réflectance des paysages «variables».

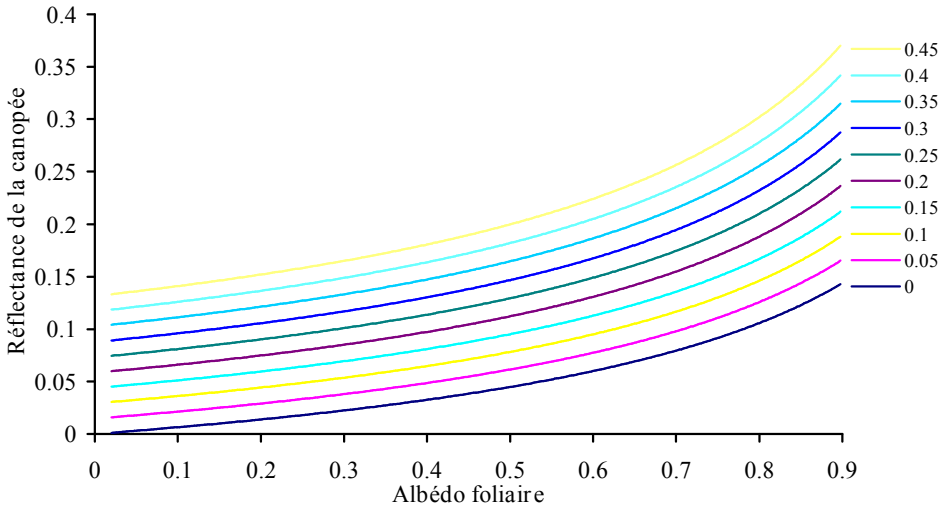
III.1.3. Simulations DART de la réflectance du couvert

La réflectance $R(\omega_f,\rho_{sb},\Omega_s,\Omega_v)$ du couvert pour n'importe quel couple (ω_f,ρ_{sb}) a été obtenue à l'aide de deux interpolations. Dans un premier temps, les équations de tendance (polynôme de degré 4) ont permis de calculer les réflectances du couvert $R(\omega_f,\rho_{sbi},\Omega_s,\Omega_v)$ et $R(\omega_f,\rho_{sbi}+\Delta\rho_{sb},\Omega_s,\Omega_v)$ telles que $\rho_{sb} \in [\rho_{sbi}\ \rho_{sbi}+\Delta\rho_{sb}]$ avec $\Delta\rho_{sb} = 0.05$. Une interpolation linéaire entre ces deux valeurs de la réflectance a ensuite été appliquée pour calculer la réflectance $R(\omega_f,\rho_{sb},\Omega_s,\Omega_v)$ exacte du couvert.

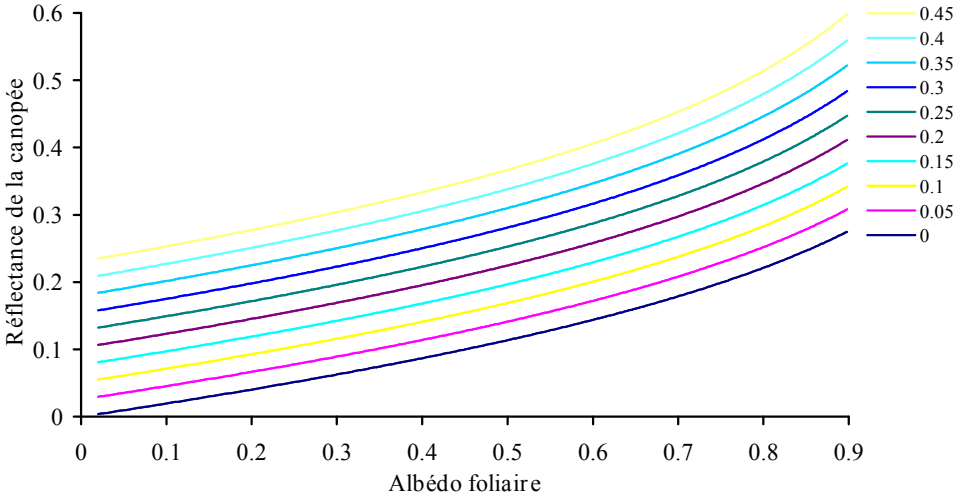
L'association « concentration biochimique / ω_f » a alors permis de calculer la réflectance du couvert pour toute concentration biochimique, toute longueur d'onde, toute direction de visée et toute réflectance du sous-bois (Fig. 4-13).



a)



b)



c)

Figure 4-12: Réflectances DART du couvert en fonction de l'albédo foliaire et pour différentes réflectances du sol: a) visée au nadir, b) visée oblique ($_v$=31.2°; $_v$=102°), c) visée en rétrodiffusion ($_v$=31.2°; $_v$=222°).

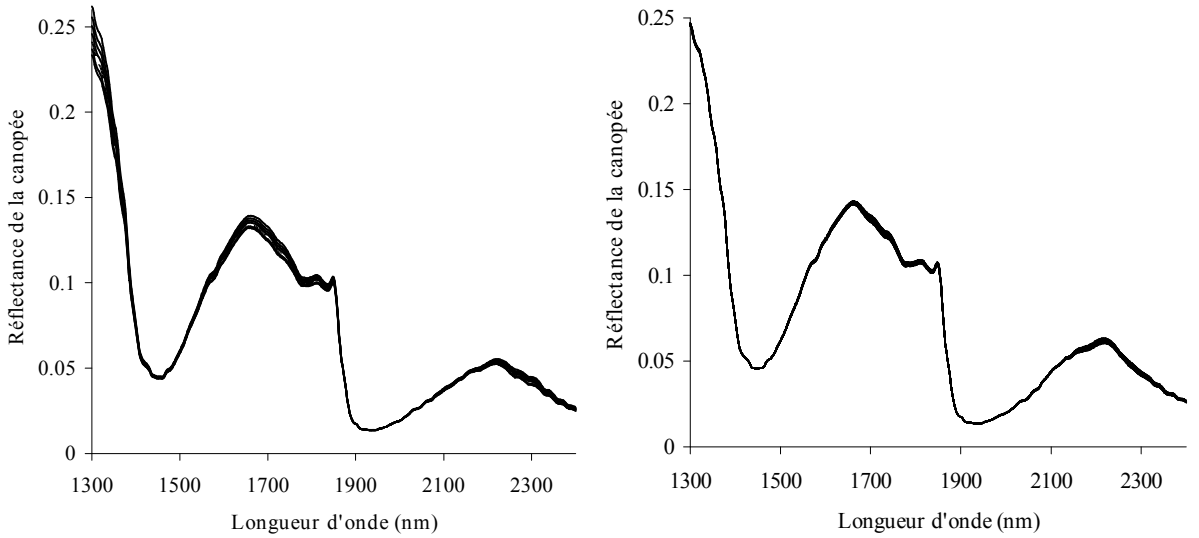


Figure 4-13: Spectres DART du couvert au nadir pour une concentration (a) en cellulose variant de 15 à 45% de MS et (b) une concentration en protéines variant de 1 à 15.5% de MS. Le sous-bois est homogène (LAI = 2) et possède des propriétés optiques foliaires indépendantes de celles du couvert.

III.2. Etablissement des équations prédictives

Une analyse par régression pas à pas a ensuite été appliquée sur les spectres de réflectance DART du couvert pour déterminer les longueurs d'onde et les équations linéaires associées prédictives des concentrations chimiques. Afin d'obtenir la meilleure régression possible, le nombre d'échantillons disponibles doit être largement supérieur au nombre de longueurs d'onde N_λ. Dans notre cas, compte tenu du pas d'échantillonnage des longueurs d'onde, N_λ est égal à 95. Nous avons réalisé en général de 285 à 850 simulations associées à différentes compositions biochimiques et à différents types de sous-bois. Ce nombre est supérieur de 3 à 9 fois au nombre de longueurs d'onde disponibles, ce qui est nécessaire pour assurer une bonne fiabilité les longueurs d'onde prédictives (Hruschka, 1987). Ce critère est d'autant plus satisfait que les réflectances du couvert sont fortement corrélées dans différents domaines spectraux (Fig. 4-14).

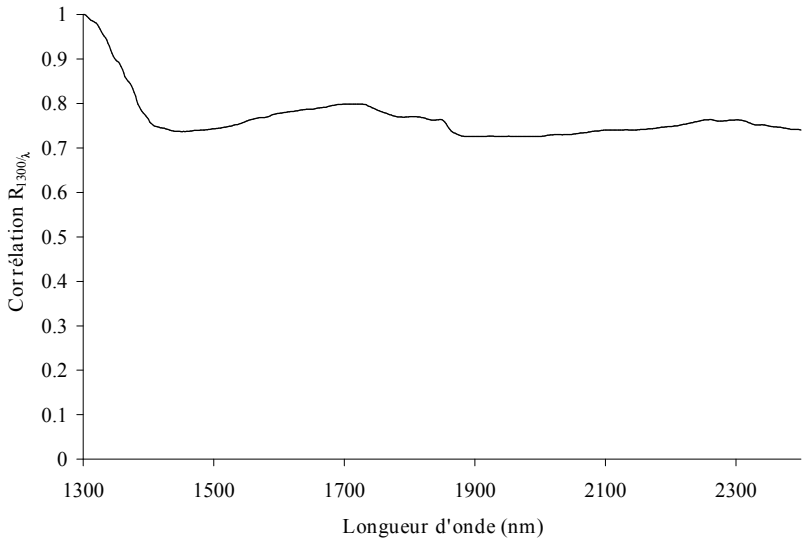


Figure 4-14

Corrélogramme de la réflectance du couvert au nadir à 1300 nm avec la réflectance du couvert dans le domaine spectral [1300 nm 2400 nm].

Il convient toutefois de noter que toutes les corrélations indiquées ci-dessus ont été obtenues dans le cas où seule la concentration chimique est variable. Ainsi, la concentration en eau et le LAI du couvert sont supposés constants.

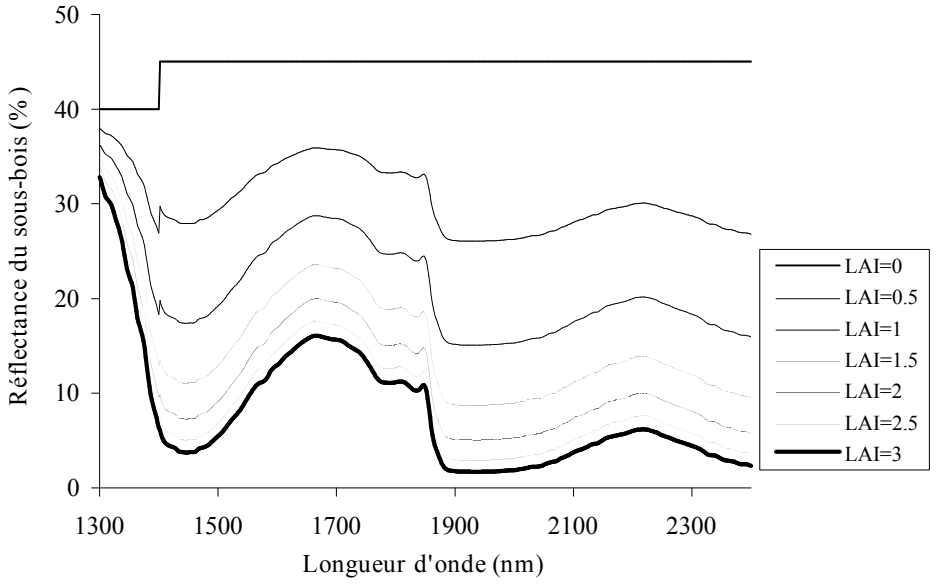
Plusieurs critères ont été utilisés lors de la sélection des bandes spectrales « prédictives » et de la détermination des relations linéaires associées:

- les coefficients de corrélation multiple (r^2) entre les concentrations réelles et prédites sont pris aussi élevés que possible.
- les valeurs du test statistique T-Ratio* (Test de Student) sont telles que les bandes « prédictives » sélectionnées ont une probabilité critique de rejet inférieure à 1%.
- les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) sont les plus petites possibles.

Les simulations DART ont été effectuées avec différents sous-bois:

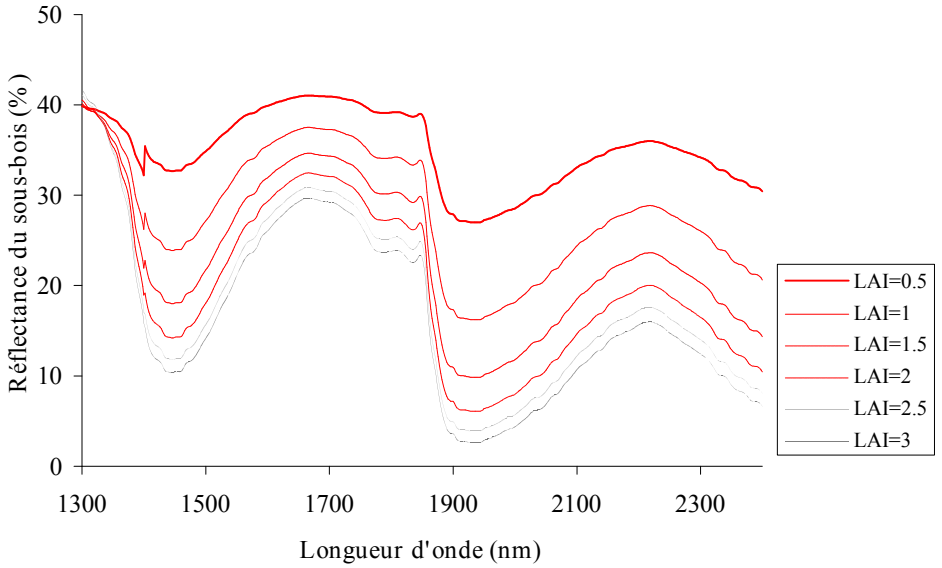
- SB1: Sol nu clair lambertien ($\rho_{sb} = 0.4$ si $\lambda < 1400$ nm et $\rho_{sb} = 0.45$ ailleurs).
- SB2: Sol nu + couche d'herbe plane uniforme (1 espèce végétale, LAI = 2).
- SB3: Sol nu + couche d'herbe plane uniforme (1 espèce végétale, LAI $\in$ [0 3]).
- SB4: Sol nu + couche d'herbe plane uniforme (2 espèces végétales, LAI $\in$ [0 3]).
- SB5: Sol nu + couche d'herbe plane uniforme (4 espèces végétales, LAI $\in$ [0 3]).

Les espèces végétales sont caractérisées par des propriétés optiques différentes. Leur introduction a pour objectif de simuler la variabilité naturelle des sous-bois. Les 5 types de sous-bois considérés ci-dessus sont notés SB1 à SB5. La figure 4-15 illustre la variabilité spectrale de la réflectance du couvert dans le cas SB5.



a)

*Les coefficients T-Ratio de la régression multiple « $Y = C_1.X_1+C_2.X_2+...+C_i.X_i+...+C_n.X_n$ » sont calculés pour chaque prédicteur X_i. Ils sont égaux au rapport $\frac{C_i}{\sigma_i}$, où σ_i est l'écart-type associé au coefficient C_i.



b)

Figure 4-15: Réflectances d'un sous-bois homogène pour différents LAI de 0 à 3. a) et b) correspondent à des espèces végétales différentes et donc à des propriétés optiques foliaires différentes.

La première étape a consisté à déterminer par simulation une base de données $\rho_{sb}(\lambda)$ pour chaque type de sous-bois. Ainsi, pour SB4 nous avons la base $\rho_{SB4}(\omega_1,\omega_2,LAI)$ où LAI est l'indice foliaire ($LAI \in [0\ 3]$, $\Delta LAI = 0.5$) des 2 espèces végétales d'albédo foliaire ω_1 et ω_2. Les spectres foliaires ont été simulés avec le modèle PROSPECT. La correspondance $\omega_1 = \omega_1(\lambda)$ et $\omega_2 = \omega_2(\lambda)$ permet de se ramener à la base de données $\rho_{SB4}(\lambda,LAI)$.

Les réflectances du couvert $R(\omega_f,\rho_{sb})$ ont alors été calculées pour différentes concentrations biochimiques c, par interpolation sur l'albédo de diffusion simple ω_f des feuilles de la canopée ($\omega_f \in [0\ 0.9]$; $\Delta\omega_f = 0.002$) et sur ρ_{SB}. La correspondance $\omega_f = \omega_f(\lambda,c)$ permet donc de considérer que la réflectance du couvert est une fonction $R(\lambda,c,\rho_{SB})$ de la longueur d'onde, de la concentration biochimique foliaire c et d'un terme ρ_{SB} représentant la réflectance du sous-bois.

Les régressions « réflectance du couvert / concentrations biochimiques foliaires » ont été effectuées pour plusieurs configurations d'observation:

- Visée au nadir
- Visée oblique avec $\theta_v = 31.2°$ et $\phi_v = 102°$
- Visée selon la direction de rétrodiffusion ($\theta_v = 31.2°$ et $\phi_v = 222°$)
- Visée selon la direction spéculaire ($\theta_v = 31.2°$ et $\phi_v = 42°$).

III.2.1. Observation au nadir

Les tableaux 4-8 présentent les longueurs d'onde optimales sélectionnées par la régression pas à pas pour la cellulose, la lignine et les protéines, à partir des spectres DART de réflectance du couvert (R) et des spectres dérivés en ln(1/R), dans le cas d'observations au nadir et pour les 5 types de sous-bois SB1 à SB5. Le coefficient de corrélation multiple (r^2) et son intervalle de confiance à 95% ainsi que l'erreur quadratique moyenne sont indiqués. Le nombre de longueurs d'onde sélectionnées a été volontairement limité à 3.

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
1	>0.99	>0.99	>0.99
2	>0.99	>0.99	>0.99
3	1300/1670: 0.99 (2.10^{-3}) 1300/1720*: 0.99 (2.10^{-3}) 1300/1980: 0.99 (3.10^{-3})	1330/1350: 0.99 (3.10^{-3}) 1330/1680*: 0.99 (3.10^{-3}) 1330/1980/1690*: 0.99 (2.10^{-3})	1300/1880/2300*: 0.95 (9.10^{-3}) 1300/1750/1620: 0.96 (8.10^{-3})
4	1300/1310/1340: 0.94 [0.935 0.956] (2.10^{-2}) 1300/1660/1880: 0.99 [0.992 0.995] (7.10^{-3})	1710/1380/1630: 0.74 [0.698 0.783] (3.10^{-2}) 1330/1370/1720: 0.70 [0.652 0.747] (3.10^{-2}) 1300/1400*/2210: 0.76 [0.721 0.800] (2.10^{-2})	1710/1650/1630: 0.93 [0.917 0.944] (1.10^{-2})
5	1300/1310/1320: 0.75 [0.717 0.78] (4.10^{-2}) 1300/1710*/1550: 0.91 [0.895 0.92] (2.10^{-2}) 1380/1620/1980: 0.89 [0.878 0.907](2.10^{-2})	1300/1400*/1860: 0.64 [0.599 0.678] (3.10^{-2}) 1300/1520/1860: 0.60 [0.555 0.640] (3.10^{-2})	1710/1660/1690: 0.47 [0.421 0.527] (3.10^{-2}) 1730*/1660/1690: 0.49 [0.437 0.541] (3.10^{-2})

a)

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
1	>0.99	>0.99	>0.99
2	>0.99	>0.99	>0.99
3	1300/1670: 0.99 (7.10^{-3}) 1300/1330: 0.99 (4.10^{-3})	1300/1330/1350: 0.99 (4.10^{-3}) 1330/1670/2160: 0.99 (4.10^{-3})	1300/1660/1740*: 0.94 (1.10^{-2}) 1710/1650/1630: 0.94 (1.10^{-2})
4	1300/1310/1340: 0.94 [0.933 0.955] (2.10^{-2}) 1300/1660/1700: 0.97 [0.960 0.973] (2.10^{-2}) 1720*/1640/1710*: 0.97 [0.966 0.977] (1.10^{-2})	1300/1610/1750: 0.94 [0.923 0.947] (1.10^{-2}) 1300/1400*/2160: 0.98 [0.972 0.981] (9.10^{-3})	1710/1650/1640: 0.94 [0.928 0.951] (1.10^{-2})
5	1300/1310/1320: 0.75 [0.717 0.779] (4.10^{-2}) 1300/1710*/1570: 0.87 [0.849 0.884] (3.10^{-2})	1710/1400*/1530*: 0.81 [0.788 0.837] (3.10^{-2})	1690/1660/1650: 0.43 [0.375 0.484] (3.10^{-2})

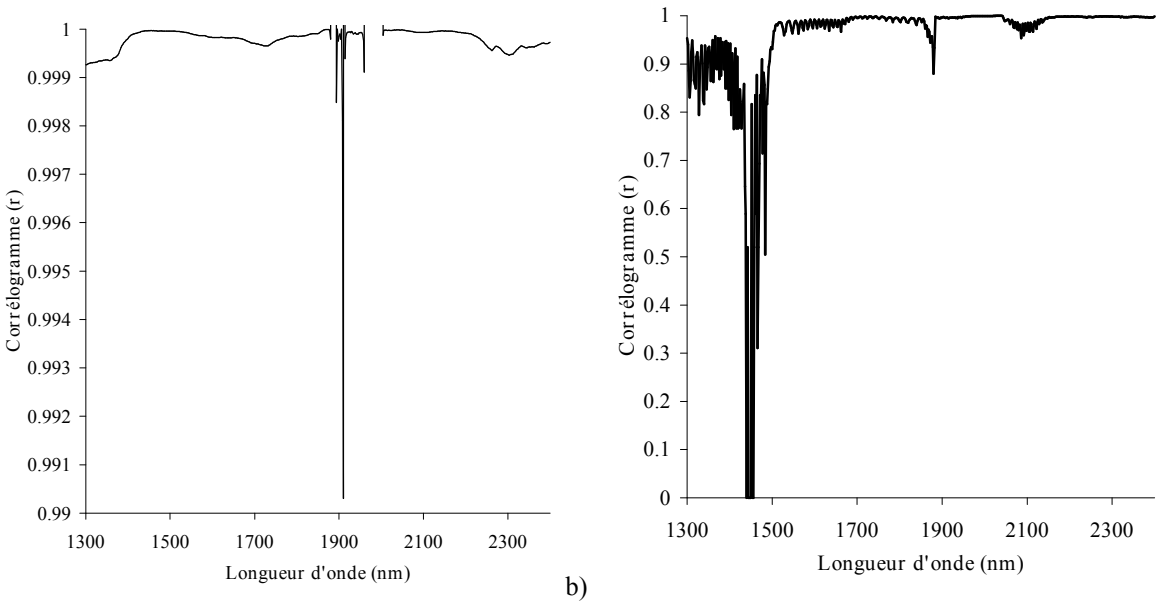
b)

Tableau 4-8: Corrélations (r^2), intervalles de confiance à 95% de r² et erreurs quadratiques moyennes (% de MS) entre les concentrations chimiques simulées et prédites. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique à partir des (b) spectres DART de réflectance du couvert (R) ou des (a) spectres dérivés en ln(1/R) sont mentionnées selon l'ordre de sélection. Les longueurs d'onde situées à moins de 10 nm d'une bande d'absorption du composé sont repérées avec le signe *.

Les résultats diffèrent beaucoup selon le type de sous-bois. Ils sont commentés ci-dessous :

- Sol et sous-bois identiques entre les échantillons (SB1 et SB2):

Des corrélations (r^2) supérieures à 99.9% sont obtenues pour les trois composés biochimiques à partir des spectres de réflectances en (R) et des spectres dérivés en ln(1/R). Les longueurs d'onde sélectionnées sont identiques pour un même composé dans les cas 1 et 2. En effet, le sol et le sous-bois sont tous deux sources d'un bruit spectral identique pour toutes les simulations réalisées avec des concentrations variables en lignine, cellulose et protéines. Ce bruit est cependant spectralement variable et est modulé par le couvert. Plusieurs longueurs d'onde permettent à elles seules d'obtenir de fortes corrélations avec un r^2 supérieur à 99% (Fig. 4-16), en particulier dans le cas de la cellulose. Il en résulte que le nombre de couples de longueurs d'onde (λ_1,λ_2) donnant une très forte corrélation est grand. On peut remarquer toutefois que certaines bandes présentent des corrélations particulièrement faibles ($r^2 \approx 0$). Elles correspondent à des bandes spectrales qui ne sont pas sensibles aux variations de réflectance induites par les concentrations des différents composés biochimiques au niveau foliaire et par conséquent au niveau du couvert.



a) b)

Figure 4-16: Corrélogramme entre la réflectance de couvert simulé avec des concentrations variables en a) cellulose et b) protéine. Le sous-bois est homogène (LAI = 2) et comprend une seule espèce végétale (SB2).

- Sol et sous-bois variables entre les échantillons (SB3, SB4 et SB5):

Le fait de considérer des sous-bois différents entre les échantillons diminue beaucoup la corrélation et ce d'autant plus que la variabilité du sous-bois est grande. Ainsi, l'application d'une équation prédictive établie avec un sous-bois comprenant deux types de végétation et un indice foliaire variant entre 0 et 3 (SB4) sur des échantillons présentant encore plus d'hétérogénéité (SB5) fait décroître de coefficient de corrélation r^2 et élargit l'intervalle de confiance de r^2. Pour la cellulose, r^2 diminue de 0.99 (SB4) à 0.64 (SB5) avec l'application de l'équation prédictive suivante:

$$[\text{Cellulose}] = -2.2 + 3.296.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 1.5994.\ln\left(\frac{1}{R(_{1660})}\right) + 0.3158.\ln\left(\frac{1}{R(_{1880})}\right)$$

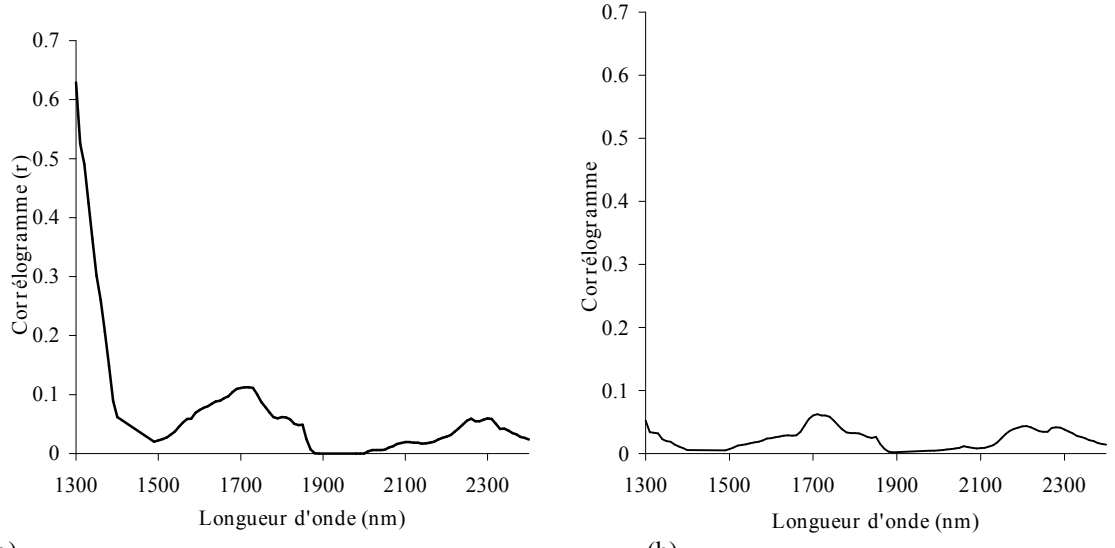
La diminution de r^2 est beaucoup plus importante dans le cas des protéines où r^2 passe de 0.94 (SB4) à 0.20 (SB5) avec l'équation prédictive:

$$[\text{Protéine}] = -0.10002 - 52.337.\text{R}(\ _{1710}) + 42.55.\text{R}(\ _{1650}) + 7.93.\text{R}(\ _{1640})$$

L'établissement de nouvelles équations prédictives adaptées aux sous-bois les plus hétérogènes (SB5) montre que les r^2 sont tout de même plus faibles que dans le cas SB4 (lignine: $r^2 = 98\% \rightarrow 81\%$ avec les spectres en R) et deviennent parfois très faibles (protéines: $r^2 = 43\%$ avec spectre en R et $r^2 = 49\%$ avec spectre en ln(1/R)). On constate également que les longueurs d'onde sélectionnées pour les meilleures régressions dans le cas SB5 ne sont pas identiques à celles du cas SB4. Le nombre de triplets de longueurs d'onde (λ_1,λ_2,λ_3) donnant des corrélations correctes est alors assez réduit (<5). Le triplet retenu est celui qui est le plus robuste (écart quadratique moyen faible) à la variation du sous-bois et non celui qui correspond à la meilleure corrélation.

Les coefficients de corrélation calculés à partir des spectres de réflectances (R) et ln(1/R) sont similaires. L'utilisation des spectres ln(1/R) n'apporte une amélioration que pour la lignine. On retrouve en général les mêmes bandes sélectionnées pour chaque composé.

La figure 4-17a présente le corrélogramme entre la concentration en cellulose et la réflectance du couvert pour un sous-bois comprenant 4 types de végétation (SB5). On constate une forte diminution de la corrélation pour les bandes spectrales comprises entre 1300 et 1400 nm. Ceci est lié au fait que la dynamique des réflectances du couvert en fonction de la concentration foliaire en cellulose, diminue fortement dans cette région spectrale (Fig. 4-13a). Dans le cas des protéines, toutes les corrélations sont faibles (Fig. 4-17b), ce qui explique pourquoi l'association de 3 bandes dans le cas SB5 ne permet pas d'obtenir de bonnes corrélations.



(a) (b)

Figure 4-17: Corrélogramme entre la concentration en (a) cellulose et en (b) protéine, et la réflectance du couvert [1300 2400 nm] pour un sous-bois comprenant 4 espèces végétales (SB5).

La figure 4-18 présente les régressions établies pour les 3 composés biochimiques à partir des spectres de réflectance ou des spectres en ln(1/R) dans le cas SB4. Contrairement à la lignine et aux protéines, les points de mesures de la cellulose, c'est à dire les concentrations estimées, sont très resserrés autour de la droite de régression. Ceci se traduit par un fort coefficient de corrélation r^2 et une faible erreur quadratique moyenne. On constate également

que les points de mesures de la cellulose et la lignine sont disposés sur des droites plus ou moins parallèles à la droite de régression. Les points de mesures sur ces différentes droites sont en effet associés à un même sous-bois (même caractéristique réflectance et transmittance foliaire et même LAI). Dans le cas des protéines, les points de mesures ne sont pas disposés sur des droites mais présentent une forme en escalier. Ceci indique que notre pas d'échantillonnage des concentrations est trop fin et qu'un pas de variation des concentrations approximativement 3 fois plus grand aurait été suffisant.

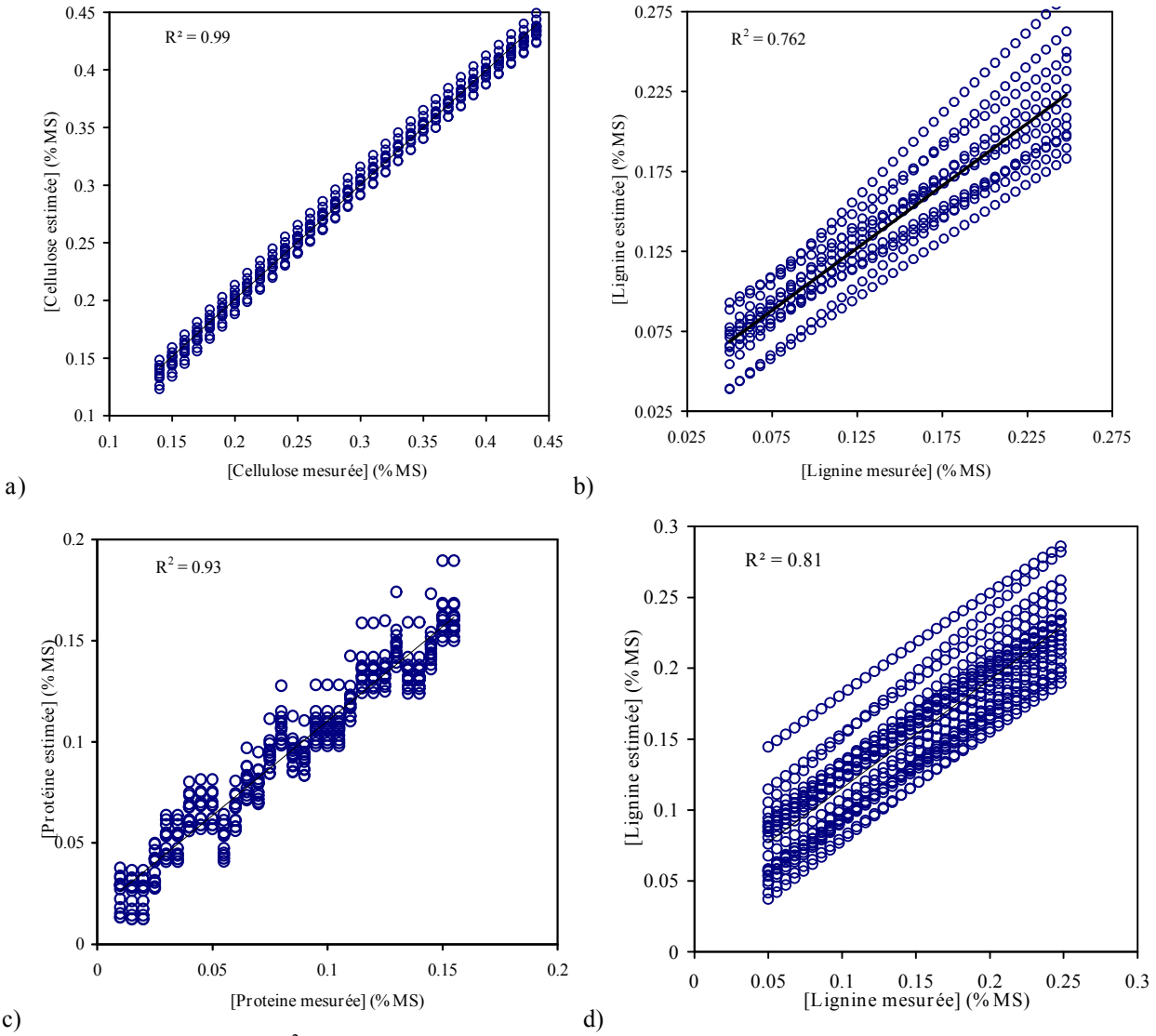


Figure 4-18: Corrélations (r^2) entre les concentrations réelles et estimées de la (a) cellulose, de la (b,d) lignine et des (c) protéines établies sur des spectres de réflectances R ou dérivés en ln(1/R) et dans le cas d'un sous-bois de type 4 (a,b,c) et 5 (d). Les équations prédictives sont:

a) $[\text{Cellulose}] = -2.2 + 3.296.\ln(\frac{1}{R(_{1300})}) - 1.5994.\ln(\frac{1}{R(_{1660})}) + 0.3158.\ln(\frac{1}{R(_{1880})})$

b) $[\text{Lignine}] = 0.57687 + 0.57.\ln(\frac{1}{R(_{1300})}) - 2.906.\ln(\frac{1}{R(_{1400*})}) + 2.251.\ln(\frac{1}{R(_{2210})})$

c) $[\text{Protéine}] = 0.0495 + 8.274.\ln(\frac{1}{R(_{1710})}) - 7.43.\ln(\frac{1}{R(_{1650})}) - 1.04.\ln(\frac{1}{R(_{1630})})$

d) $[\text{Lignine}] = -0.06856 - 0.86.R(_{1300}) + 93.31.R(_{1400*}) - 81.R(_{1530*})$

La figure 4-19 présente les différences absolues des spectres de réflectance foliaire correspondant aux concentrations minimales et maximales des 3 composés biochimiques. Elle met en évidence les régions spectrales pour lesquelles la variabilité de la réflectance foliaire induite par la variabilité de la concentration biochimique est maximale: [1300 1350 nm], [1650 1750 nm] et [2200 2300 nm] pour la cellulose, [1650 1750 nm] et [2100 2200 nm] pour la lignine, et [1650 1750 nm] et [2150 2300 nm] pour les protéines. Ceci explique pourquoi les bandes sélectionnées par régression sont situées dans ces régions spectrales.

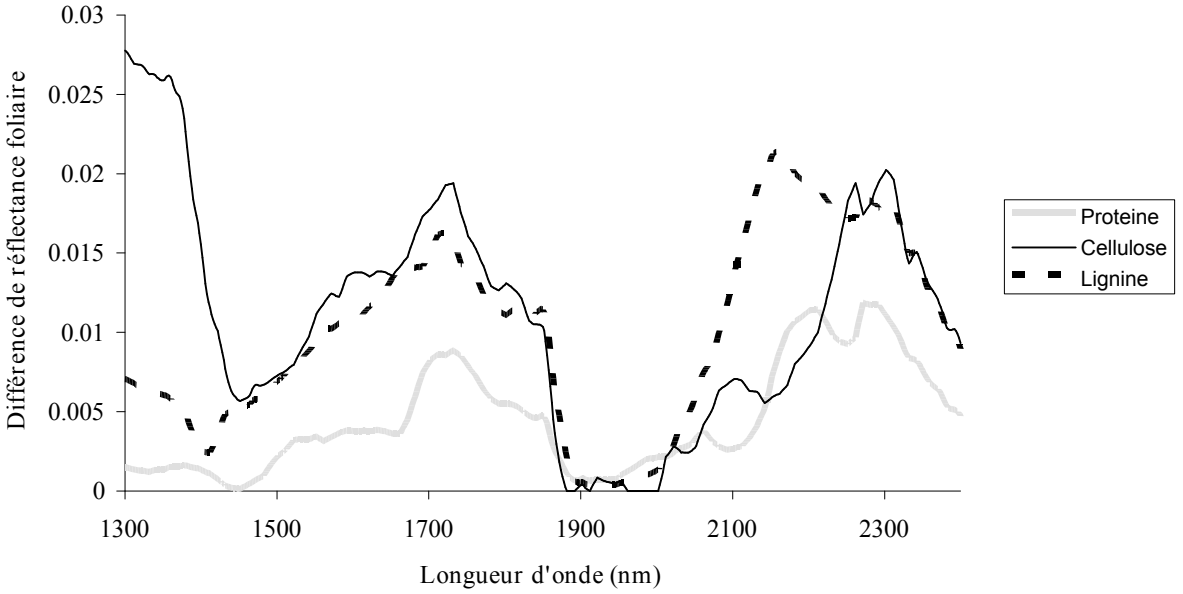


Figure 4-19: Différence absolue des réflectances foliaires correspondant aux spectres de concentrations minimales et maximales en cellulose, lignine et protéine.

Une autre approche a ensuite été testée pour tenter de réduire l'influence du sous-bois. Elle a consisté à établir les équations prédictives (Tableau 4-9), non plus à partir des réflectances brutes en R ou ln(1/R) mais à partir de la dérivée-1ère des réflectances (Fig. 4-20 et 4-21), conformément aux travaux de Demetriades-Shah et al. (1990), Hruschka (1987) et Bouchaud (1996). L'hypothèse sous-jacente est que le sous-bois induit une variabilité spectrale $\frac{R}{}$ indépendante et inférieure à celle associée aux concentrations biochimiques.

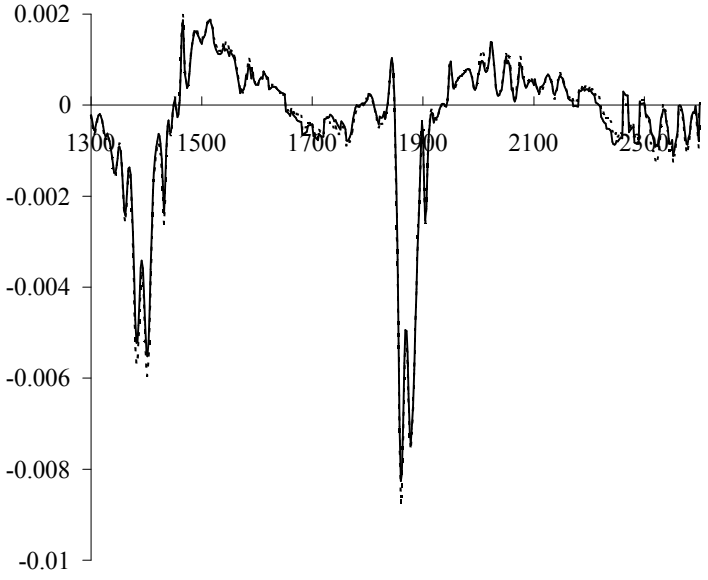


Figure 4-20

Spectres dérivées 1ère de la réflectance foliaire pour les concentrations minimale (15% de MS) et maximale (--- 45% de MS) en cellulose.

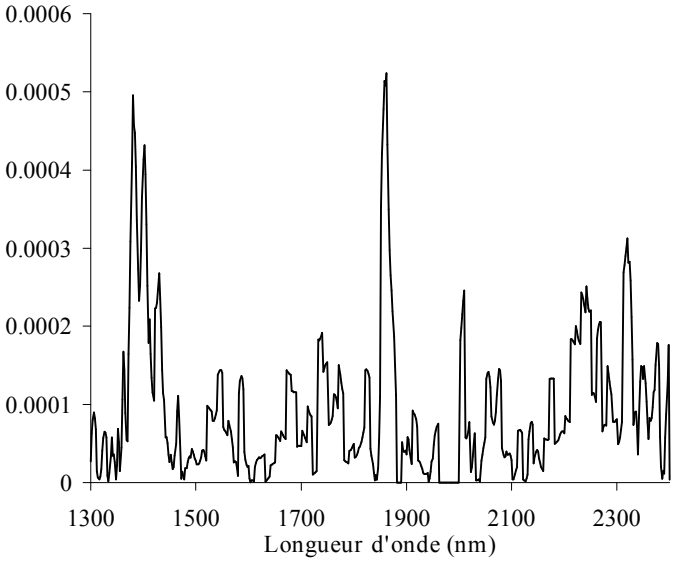


Figure 4-21

Valeur absolue de la différence des spectres dérivées 1ère de la réflectance foliaire pour les concentrations minimale (15% de MS) et maximale (45% de MS) en cellulose.

Les figures 4-20 et 4-21 illustrent la faible variabilité des spectres dérivées 1ère en fonction des concentrations biochimiques. Il apparaît cependant que l'utilisation des spectres dérivées-1ère tend à améliorer les résultats pour les protéines (r^2 = 43% → 76% pour SB5). Pour la lignine, les résultats sont légèrement meilleurs par rapport aux régressions sur R mais plus mauvais par rapport aux régressions sur les spectres en ln(1/R). Pour la cellulose (Fig. 4-22), l'utilisation des spectres dérivés induit toujours de plus mauvais résultats.

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
3	2320/2240/2050: 0.98 [0.976 0.986] (1.10^{-2})	2080/1490/2150: 0.97 [0.956 0.973] (1.10^{-2})	2150*/2260*/1350: 0.89 [0.855 0.914] (1.10^{-2})
4	1670/2210/1660: 0.90 [0.884 0.921] (3.10^{-2})	1700/2380*/2300: 0.88 [0.840 0.888] (2.10^{-2})	1670/2220/1680: 0.72 [0.664 0.762] (2.10^{-2})
5	2210/2220/1690: 0.80 [0.778 0.829] (4.10^{-2})	2110/2260*/2380*: 0.76 [0.766 0.791] (3.10^{-2})	2160*/2260*/2150*: 0.76 [0.729 0.790] (2.10^{-2})

Table 4-9: Corrélations (r^2), intervalles de confiance à 95% de r^2 et erreurs quadratiques moyennes (% de MS) entre concentrations chimiques simulées et prédites. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique sur les spectres dérivées 1ère de réflectance du couvert sont mentionnées selon l'ordre de sélection.

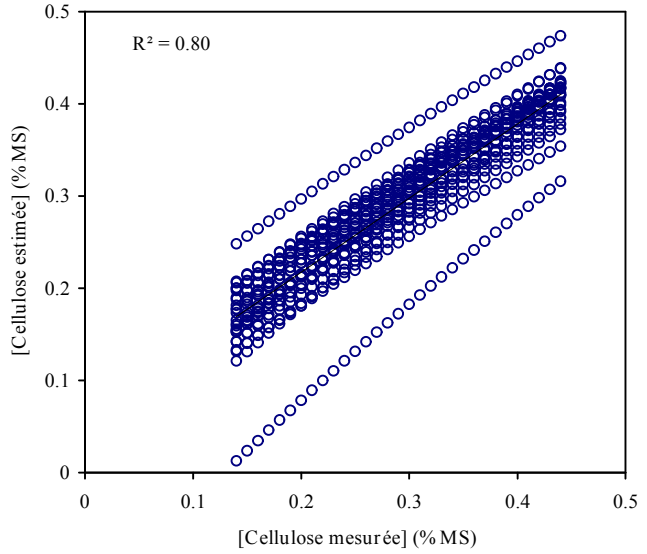


Figure 4-22:

Corrélations (r^2) entre les concentrations réelles et estimées de cellulose établies pour un sous-bois comportant 4 espèces végétales. La courbe provient de l'équation prédictive suivante basée sur les dérivées premières des réflectances:

$$[\text{Cellulose}] = 0.6626 - 2431.R'_{(2210)} - 2985.R'_{(2220)} + 1996.R'_{(1690)}$$

Les dérivées-2ème des réflectances sont aussi parfois utilisées pour établir des équations prédictives (Demetriades-Shah et al., 1990). Dans notre cas, elles n'ont pas apporté d'améliorations significatives sur r². Il convient de noter que les longueurs d'onde sélectionnées dans les différentes configurations ne correspondent pas toujours aux bandes d'absorption des composés ni aux bandes sélectionnées avec les spectres en R ou ln(1/R).

III.2.2. Observation en visée oblique

L'intérêt d'observations en visée oblique est de minimiser l'influence du sous-bois sur la réflectance du couvert et donc de rendre les équations prédictives plus robustes vis à vis de ce facteur. Dans notre approche, trois configurations d'observation en visée oblique ont été étudiées: angle zénithal de 31.2° avec des angles azimutaux de 42° (rétrodiffusion solaire), 102° et 222° (spéculaire). Seuls les résultats concernant les couverts avec des sous-bois variables entre les échantillons (SB4 et SB5) sont présentés ci-dessous. Le tableau 4-10 indique les longueurs d'ondes sélectionnées et les corrélations (r²) associées.

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
4	1300/1660/1880: 0.95 (2.10^{-2})	1300/1400*/2170: 0.77 (3.10^{-2})	1710/1650/1630: 0.94 (1.10^{-2})
5	1300/1710*/1400: 0.74 (4.10^{-2})	1300/1400*/1860: 0.28 (5.10^{-2})	1690/1660/1300: 0.27 (4.10^{-2})

(1-a) configuration de rétrodiffusion

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
4	1300/1660/1500: 0.97 (2.10^{-2})	1300/1610/1750: 0.85 (2.10^{-2})	1710/1650/1980*: 0.90 (1.10^{-2})
5	1300/1710*/1580*: 0.82 (4.10^{-2})	1300/1400*/1860: 0.36 (4.10^{-2})	1710/1660/1720 : 0.25 (4.10^{-2})

(1-b) configuration spéculaire

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
4	1300/1660/2370: 0.99 (6.10^{-3})	1300/1400*/1860: 0.90 (2.10^{-2})	1710/1650/1630: 0.95 (1.10^{-2})
5	1300/1710*/1550: 0.93 (2.10^{-2})	1300/1400*/1860: 0.74 (3.10^{-2})	1710/1660/1690: 0.54 (3.10^{-2})

(1-c) configuration $_v$ = 31.2°, $_v$ = 102°

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
4	1720/1640/1710: 0.98 (1.10^{-2})	1300/1400*/2170: 0.97 (1.10^{-2})	1710/1650/1640: 0.95 (1.10^{-2})
5	1300/1710*/1400: 0.72 (5.10^{-2})	1710/1400*/1860: 0.35 (5.10^{-2})	1710/1660/1720: 0.25 (4.10^{-2})

(2-a) configuration de rétrodiffusion

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
4	1300/1660/1700: 0.95 (2.10^{-2})	1710/1640/1730: 0.96 (1.10^{-2})	1710/1650/1640: 0.93 (1.10^{-2})
5	1300/1710*/1580*: 0.81 (4.10^{-2})	1300/1400*/1860: 0.43 (4.10^{-2})	1710/1660/1720 : 0.25 (4.10^{-2})

(2-b) configuration spéculaire

SB	Cellulose	Lignine	Protéines
4	1300/1660/1700: 0.98 (1.10^{-2})	1300/1400*/2160: 0.98 (8.10^{-3})	1710/1650/1640: 0.95 (1.10^{-2})
5	1720/1850/1570: 0.92 (2.10^{-2})	1710/1400*/1860: 0.84 (3.10^{-2})	1710/1660/1690: 0.55 (3.10^{-2})

(2-c) configuration $_v$ = 31.2°, $_v$ = 102°

Tableau 4-10: Corrélations (r²) et erreurs quadratiques moyennes (% de MS) entre concentrations chimiques simulées et prédites pour 3 directions d'observation en visée oblique. Les régressions ont été établies à partir des spectres en (1) ln(1/R) et en (2) réflectances R du couvert.

Les corrélations (r^2) obtenues avec des configurations obliques ($\theta_v = 31.2°$ et $\phi_v = 102°$) différentes des configurations « nadir » et « rétrodiffusion » sont meilleures que pour l'observation à la verticale à la fois pour les régressions établies à partir des spectres de réflectance (R) et des spectres en ln(1/R). En effet, en visée oblique, le sous-bois joue un rôle moins important. Il est également intéressant de constater que les bandes spectrales qui ont été sélectionnées dans cette configuration de visée ($\theta_v = 31.2°$, $\phi_v = 102°$) sont en général identiques à celles sélectionnées en visée verticale. Les coefficients de la régression ne sont cependant pas égaux. Ainsi, pour la cellulose et la lignine, les équations prédictives retenues dans le cas de sous-bois comprenant quatre espèces végétales avec des indices foliaires variant entre 0 et 3 (SB5), sont:

- à la verticale:

$$[\text{Cellulose}] = -2.413 + 3.877.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 4.190.\ln\left(\frac{1}{R(_{1710*})}\right) + 2.505.\ln\left(\frac{1}{R(_{1550})}\right)$$

r^2=91%

$$[\text{Lignine}] = 0.3232 + 0.964.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 4.909.\ln\left(\frac{1}{R(_{1400*})}\right) + 4.412.\ln\left(\frac{1}{R(_{1860})}\right)$$

r^2=64%

- $_v = 31.2°$ et $_v = 102°$:

$$[\text{Cellulose}] = -2.293 + 3.505.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 3.910.\ln\left(\frac{1}{R(_{1710*})}\right) + 2.366.\ln\left(\frac{1}{R(_{1550})}\right)$$

r^2=93%

$$[\text{Lignine}] = 0.5035 + 0.922.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 5.154.\ln\left(\frac{1}{R(_{1400*})}\right) + 4.612.\ln\left(\frac{1}{R(_{1860})}\right)$$

r^2=74%

Les équations prédictives varient donc selon la direction d'observation. Toutefois, les équations prédictives présentant les mêmes bandes et des coefficients proches à la verticale et à l'oblique sont très intéressantes car elles semblent plus générales.

Dans les configurations de rétrodiffusion et spéculaire, les corrélations chutent fortement dans le cas de sous-bois très hétérogènes (SB5). Deux effets peuvent expliquer cette diminution des corrélations:

- direction de rétrodiffusion: cette configuration, communément appelée « hot-spot » est celle pour laquelle l'effet du sous-bois est maximal. Le « bruit » induit par ce dernier est donc amplifié.
- direction spéculaire: cette configuration est celle pour laquelle le signal est le plus perturbé par les ombres portées par les couronnes des arbres. De plus, la fonction de phase foliaire est relativement faible, compte tenu de l'angle zénithal d'éclairement. Le signal ainsi que le rapport « diffusion d'ordre 1 / diffusion d'ordre multiple » tendent donc à être minimaux. La plus grande importance des effets non linéaires associés aux diffusions multiples est certainement à l'origine des faibles corrélations observées. Cet effet aurait été encore plus amplifié si l'on avait tenu compte des réflections spéculaires.

III.3. Étude de la variation structurale de la canopée

L'étude théorique menée jusqu'ici a permis d'établir des équations prédictives pour un paysage « fixe » dont seules les caractéristiques du sous-bois sont variables. Le travail suivant a consisté à tester la robustesse de ces équations en fonction de la variabilité de quelques paramètres structuraux de couvert (LAI, taux de couverture, etc.).

III.3.1. Influence de l'indice foliaire

Les équations prédictives ont été établies dans les paragraphes précédents avec un paysage d'indice foliaire égal à 2.5. Ces équations ont ensuite été appliquées aux réflectances de mêmes paysages d'indices foliaires égaux à 1.0 et 4.0.

			Cellulose		
Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Fixe LAI=2.5	Variable LAI=1	Variable LAI=4
SB4	Réflectance R	1300/1310/1340	0.94	0.05	0.97 [0.962 0.974]
		1300/1660/1700	0.97	0.05	0.98 [0.975 0.983]
		1720*/1640/1710*	0.97	0.13	0.98 [0.976 0.984]
	ln(1/R)	1300/1310/1340	0.95	0.04	0.97 [0.964 0.976]
		1300/1660/1880	0.99	0.04	0.99 [0.990 0.993]
SB5	Réflectance R	1300/1310/1320	0.75	0.06	0.85 [0.827 0.867]
		1300/1710*/1570	0.87	0.01	0.93 [0.919 0.939]
	ln(1/R)	1300/1310/1320	0.75	0.04	0.85 [0.828 0.868]
		1300/1710*/1550	0.91	0.01	0.95 [0.942 0.956]
		1380/1620/1980	0.89	0.00	0.95 [0.938 0.953]

a)

			Lignine		
Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Fixe LAI=2.5	Variable LAI=1	Variable LAI=4
SB4	Réflectance R	1300/1400*/2160	0.98	0.04	0.98 [0.972 0.981]
		1300/1610/1750	0.94	0.08	0.96 [0.950 0.966]
	ln(1/R)	1710/1380/1630	0.74	0.00	0.82 [0.783 0.846]
		1330/1370/1720	0.70	0.00	0.81 [0.774 0.840]
		1300/1400*/2210	0.76	0.06	0.77 [0.729 0.806]
SB5	Réflectance R	1710/1400*/1530*	0.81	0.00	0.86 [0.843 0.879]
	ln(1/R)	1300/1400*/1860	0.64	0.01	0.76 [0.735 0.791]
		1300/1520/1860	0.60	0.05	0.51 [0.466 0.562]

b)

			Protéines		
Type de sous-bois	Equations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Fixe LAI=2.5	Variable LAI=1	Variable LAI=4
SB4	Réflectance R	1710/1650/1640	0.94	0.01	0.95 [0.940 0.959]
	ln(1/R)	1710/1650/1630	0.93	0.25	0.90 [0.884 0.921]
SB5	Réflectance R	1690/1660/1650	0.43	0.01	0.55 [0.497 0.595]
	ln(1/R)	1710/1660/1690	0.47	0.05	0.54 [0.489 0.585]
		1730*/1660/1690	0.49	0.02	0.59 [0.542 0.634]

c)

Tableau 4-11: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée de LAI = 1, 2.5 et 4 en visée verticale.

Les corrélations entre les concentrations estimées et les concentrations réelles des trois éléments biochimiques ont été calculées (Tableau 4-11) dans le cas du paysage « variable » (LAI = 1 et 4) et comparées à celles obtenues pour le paysage « fixe » (LAI = 2.5). Pour tous les composés biochimiques, l'application des équations prédictives établies au nadir donne des corrélations (r^2) non significatives pour la maquette de LAI = 1 et des corrélations légèrement plus fortes pour la maquette de LAI = 4. L'explication avancée repose sur l'importance plus ou moins grande de l'effet perturbateur du sous-bois sur le signal. Cet effet augmente beaucoup quand le LAI du couvert passe de 2.5 à 1 et diminue quand le LAI passe de 2.5 à 4. Les équations prédictives établies dans le cas du paysage de référence semblent donc robustes si on les applique à des paysages similaires de LAI égaux ou supérieurs.

La détermination de nouvelles équations prédictives à partir des spectres de réflectances du paysage de LAI = 4 a très peu amélioré les coefficients de corrélations (r^2). En effet, les bandes spectrales sélectionnées sont les mêmes que pour le paysage de référence et les coefficients des régressions sont relativement proches. Deux exemples d'équations prédictives établies pour la cellulose et les protéines sont mentionnées ci-dessous dans le cas du paysage de référence (LAI = 2.5) et du paysage variable (LAI = 4):

$$\begin{cases} \text{Paysage de référence } (LAI = 2.5): \\ [\text{Cellulose}] = -2.413 + 3.877.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 4.19.\ln\left(\frac{1}{R(_{1710*})}\right) + 2.505.\ln\left(\frac{1}{R(_{1550})}\right) \Rightarrow r^2 = 0.91 \\ \text{Paysage variable } (LAI = 4): \\ [\text{Cellulose}] = -2.253 + 3.433.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 3.662.\ln\left(\frac{1}{R(_{1710*})}\right) + 2.176.\ln\left(\frac{1}{R(_{1550})}\right) \Rightarrow r^2 = 0.95 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Paysage de référence } (LAI = 2.5): \\ [\text{Protéine }] = -0.10786 - 52.753.R(_{1710}) + 34.35.R(_{1650}) + 16.5.R(_{1640}) \Rightarrow r^2 = 0.94 \\ \text{Paysage variable } (LAI = 4): \\ [\text{Protéine }] = -0.1503 - 54.78.R(_{1710}) + 34.62.R(_{1650}) + 18.2.R(_{1640}) \Rightarrow r^2 = 0.95 \end{cases}$$

Les résultats sont logiques: seules des équations prédictives établies et utilisées avec des paysages dont le sous-bois affecte peu la réflectance du couvert peuvent être robustes et fiables avec la modification d'un paramètre tel que le LAI du couvert. La figure 4-23 présente 2 exemples de régressions entre les concentrations réelles et estimées de cellulose obtenues

avec le paysage de LAI = 4. Les résultats présentés ont été étalonnés de telle sorte que la dynamique des concentrations estimées soit identique à celle des concentrations initiales.

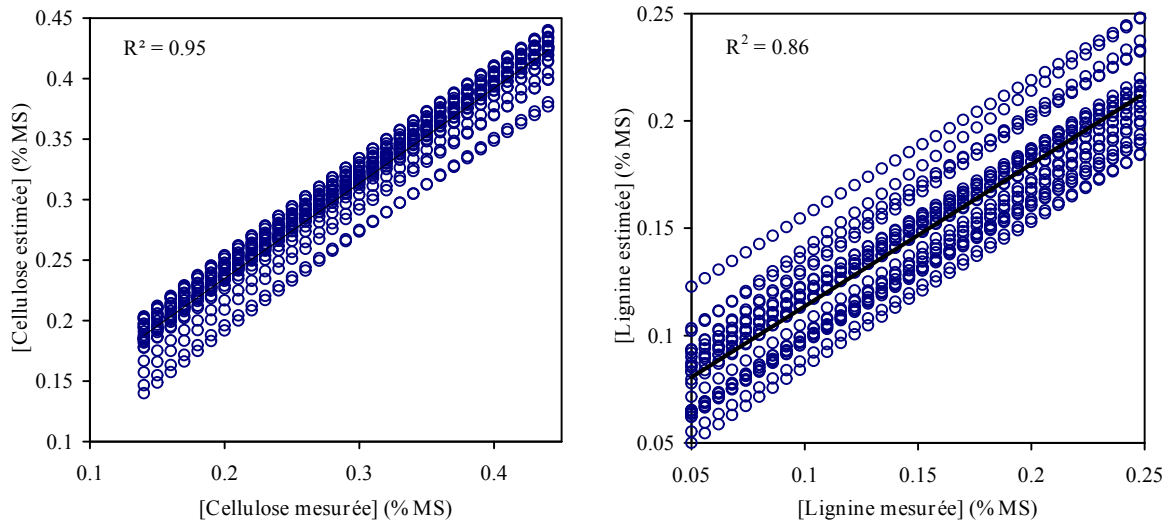


Figure 4-23: Corrélations (r²) entre les concentrations de cellulose et de lignine mesurées et estimées pour un paysage de LAI = 4. Les équations prédictives et les équations de régression avant étalonnage sont :

$$\begin{cases} [\text{Cellulose}] = -2.413 + 3.877.\ln\left(\frac{1}{R(_{1300})}\right) - 4.190.\ln\left(\frac{1}{R(_{1710*})}\right) + 2.505.\ln\left(\frac{1}{R(_{1550})}\right) \\ [\text{Cellulose estimée}] = 1.0141.\ [\text{Cellulose mesurée}] - 0.072 \end{cases}$$

$$\begin{cases} [\text{Protéine}] = -0.18732 - 1.21.R(_{1710}) + 100.73.R(_{1400}) - 79.2.R(_{1530}) \\ [\text{Protéine estimée}] = 0.7353.\ [\text{Protéine mesurée}] + 0.0995 \end{cases}$$

Les équations prédictives établies à partir des dérivées premières des réflectances (Tableau 4-12) donnent en général des résultats similaires à ceux établis à partir des spectres de réflectances. Les corrélations diminuent quand les équations prédictives sont appliquées à un couvert de LAI égal à 1 et tendent à augmenter quand elles sont appliquées à un couvert de LAI égal à 4. Comme dans le cas du paysage de référence, les corrélations sont plus faibles pour les équations prédictives établies à partir des spectres dérivés des réflectances que pour les équations établies à partir des réflectances. L'application de l'équation obtenue pour la lignine avec un sous-bois de type SB5 ne donne pas de corrélation significative dans le cas d'un paysage variable. Ces résultats mettent en évidence la nécessité de valider les équations sélectionnées avant toute utilisation. Dans le cas des protéines et pour un sous-bois de type SB5, les corrélations sont meilleures avec les équations prédictives en R' qu'en R.

	SB	Fixe LAI=2.5	Variable LAI=1	Variable LAI=4
Cellulose	4	1670/2210/1660: 0.90	0.11	0.94 [0.929 0.952]
	5	2210/2220/1690: 0.80	0.08	0.88 [0.866 0.897]
Lignine	4	1700/2380*/2300: 0.88	0.07	0.92 [0.900 0.931]
	5	2110/2260*/2380*: 0.76	0.00	0.00
Protéines	4	1670/2220/1680: 0.72	0.05	0.78 [0.732 0.813]
	5	2160*/2260*/2150*: 0.76	0.52	0.85 [0.830 0.870]

Tableau 4-12: Corrélations (r²) et intervalles de confiance à 95% de r² entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée de LAI = 1, 2.5 et 4 en visée verticale. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique sur les spectres dérivées premières de réflectance du couvert sont mentionnées selon l'ordre de sélection.

La visée oblique (θ_v = 31.2° ; ϕ_v = 102°) donne des corrélations plus faibles que la visée nadir examinée ci-dessus, quelque soit le LAI de la parcelle (r^2<0.2). Les visées en rétrodiffusion et spéculaire n'ont pas été testées car les équations prédictives obtenues avec le paysage de référence sont très mauvaises. Les faibles valeurs obtenues à l'oblique (θ_v = 31.2° ; ϕ_v = 102°) illustrent donc l'influence de la structure du couvert. En effet, l'analyse des images de la parcelle simulées avec le modèle DART, montre que la proportion d'ombres observée dans cette direction est beaucoup plus importante que selon la visée verticale. La proportion des diffusions multiples est par conséquent plus grande. Il s'avère que la relation entre la réflectance du couvert et la réflectance foliaire (supposée être plus ou moins linéairement reliée aux concentrations biochimiques foliaires) est d'autant moins linéaire que la proportion de diffusions multiples dans le signal est élevée. Par suite, une équation prédictive, linéaire par définition, tend donc à être d'autant moins robuste que la proportion de diffusions d'ordre 1 est faible. Ceci est d'autant plus vrai que l'effet non linéaire est d'autant plus important que l'albédo foliaire est élevée. La proportion d'ombre étant nettement plus élevée dans la direction oblique (θ_v = 31.2° et ϕ_v = 102°) qu'au nadir, une augmentation du LAI peut donc fortement perturber la relation prédictive du fait de la modification de l'intensité des ombres. Dans ce cas, le fait de moins « percevoir » le bruit du sous-bois est plus que compensé par le bruit lié à la modification des caractéristiques des ombres. Cet effet aurait pu être diminué en utilisant des maquettes de LAI variable pour établir les équations prédictives.

III.3.2. Influence du taux de couverture (diamètre des couronnes)

La sensibilité des équations prédictives au taux de couverture arboré a également été testée. Ce paramètre est modifié en faisant varier le diamètre des couronnes. Ainsi, pour une variation du diamètre de 3.5 à 5.5 m, le taux de couverture de la canopée varie de 26 à 67%.

Les corrélations obtenues pour les trois composés biochimiques sont indiquées dans le tableau 4-13 pour une visée à la verticale. Les corrélations sont plus faibles lorsque le taux de couverture diminue et sont en général plus fortes lorsqu'il augmente. L'explication avancée est que l'effet perturbateur du sous-bois est d'autant plus fort que le taux de couverture arboré est faible. Toutefois, certaines équations prédictives de la cellulose restent valables (r^2>0.75) avec la diminution du diamètre. On remarque également que, pour les protéines, lorsque le taux de couverture augmente, les corrélations augmentent mais restent malgré tout assez faibles dans le cas des sous-bois les plus hétérogènes.

			Cellulose		
Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Fixe =4.5 m	Variable =3.5 m	Variable =5.5 m
SB4	Réflectance R	1300/1310/1340	0.94	0.78 [0.745 0.821]	0.97 [0.964 0.976]
		1300/1660/1700	0.97	0.41	0.93 [0.920 0.945]
		1720*/1640/1710*	0.97	0.13	0.77 [0.728 0.810]
	ln(1/R)	1300/1310/1340	0.95	0.79 [0.747 0.823]	0.94 [0.966 0.977]
		1300/1660/1880	0.99	0.93 [0.913 0.941]	0.99 [0.983 0.991]
SB5	Réflectance R	1300/1310/1320	0.75	0.38	0.86 [0.844 0.881]
		1300/1710*/1570	0.87	0.59	0.91 [0.900 0.924]
	ln(1/R)	1300/1310/1320	0.75	0.38	0.86 [0.849 0.882]
		1300/1710*/1550	0.91	0.75 [0.718 0.780]	0.92 [0.914 0.935]
		1380/1620/1980	0.89	0.40	0.96 [0.951 0.963]

(a)

Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Lignine Fixe =4.5 m	Lignine Variable =3.5 m	Lignine Variable = 5.5 m
SB4	Réflectance R	1300/1400*/2160	0.98	0.31	0.90 [0.881 0.917]
		1300/1610/1750	0.94	0.19	0.85 [0.821 0.874]
	ln(1/R)	1710/1380/1630	0.74	0.16	0.90 [0.877 0.914]
		1330/1370/1720	0.70	0.15	0.93 [0.913 0.939]
		1300/1400*/2210	0.76	0.06	0.90 [0.884 0.920]
SB5	Réflectance R	1710/1400*/1530*	0.81	0.2	0.93 [0.924 0.942]
	ln(1/R)	1300/1400*/1860	0.64	0.13	0.81 [0.784 0.831]
		1300/1520/1860	0.60	0.03	0.80 [0.778 0.826]

(b)

Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Protéines Fixe =4.5 m	Protéines Variable =3.5 m	Protéines Variable = 5.5 m
SB4	Réflectance R	1710/1650/1640	0.94	0.21	0.84 [0.812 0.870]
	ln(1/R)	1710/1650/1630	0.93	0.62	0.95 [0.936 0.957]
SB5	Réflectance R	1690/1660/1650	0.43	0.08	0.58 [0.534 0.627]
	ln(1/R)	1710/1660/1690	0.47	0.19	0.56 [0.515 0.611]
		1730*/1660/1690	0.49	0.16	0.64 [0.591 0.676]

(c)

Tableau 4-13: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, la (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée dont le taux de couverture est égal à 25.7%, 47.9% et 67.4% (visée verticale).

On retrouve des résultats similaires avec les équations prédictives établies à partir des dérivées premières des réflectances (Tableau 4-14).

	SB	Fixe = 4.5 m	Variable = 3.5 m	Variable = 5.5 m
Cellulose	4	1670/2210/1660: 0.90	0.48	0.95 [0.937 0.957]
	5	2210/2220/1690: 0.80	0.32	0.90 [0.881 0.909]
Lignine	4	1700/2380*/2300: 0.88	0.23	0.86 [0.837 0.885]
	5	2110/2260*/2380*: 0.76	0.00	0.00
Protéines	4	1670/2220/1680: 0.72	0.35	0.77 [0.723 0.806]
	5	2160*/2260*/2150*: 0.76	0.38	0.87 [0.850 0.885]

Tableau 4-14: Corrélations (r^2) et intervalles de confiance à 95% de r^2 entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée de taux de couverture = 25.7%, 47.9% et 67.4% en visée verticale. Les longueurs d'onde optimales issues de la régression statistique sur les spectres dérivées premières de réflectance du couvert sont mentionnées selon l'ordre de sélection.

Les corrélations évolue généralement comme le taux de couverture arboré. On remarque également que les corrélations sont plus faibles avec les équations prédictives établies à partir des spectres dérivés des réflectances qu'avec les équations établies à partir des réflectances excepté dans le cas des protéines et pour un sous-bois de type SB5. On retrouve, comme pour « LAI variable », que l'équation prédictive appliquée dans le cas de la lignine pour un sous-bois de type SB5 ne donne pas de corrélation significative. On peut donc supposer que cette équation prédictive n'est pas robuste à la variation de paramètres biophysiques du couvert.

En visée oblique (θ_v = 31.2° et ϕ_v = 102°), les corrélations obtenues pour les trois composés biochimiques diminuent quand le diamètre des couronnes décroît. Au contraire, l'augmentation du diamètre des couronnes, et donc du taux de couvert arboré, donne des corrélations du même ordre de grandeur que dans le cas du paysage de référence. Les intervalles de confiance à 95% de r² sont tout à fait convenables (Tableau 4-15). La diminution du bruit associé au sous-bois semble donc jouer un rôle majeur.

a)

			Cellulose		
Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Fixe =4.5 m	Variable =3.5 m	Variable = 5.5 m
SB4	Réflectance R	1300/1660/1700	0.98	0.36	0.95 [0.945 0.963]
	ln(1/R)	1300/1660/2370	0.99	0.84	0.99 [0.992 0.994]
SB5	Réflectance R	1720/1850/1570	0.92	0.49	0.97 [0.963 0.972]
	ln(1/R)	1300/1710*/1550	0.93	0.84	0.94 [0.930 0.947]

b)

			Lignine		
Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Fixe =4.5 m	Variable =3.5 m	Variable = 5.5 m
SB4	Réflectance R	1300/1400*/2160	0.98	0.21	0.93 [0.913 0.939]
	ln(1/R)	1300/1400*/1860	0.90	0.19	0.88 [0.857 0.900]
SB5	Réflectance R	1710/1400*/1860	0.84	0.18	0.91 [0.894 0.919]
	ln(1/R)	1300/1400*/1860	0.74	0.14	0.89 [0.880 0.908]

c)

			Protéines		
Type de sous-bois	Équations établies à partir des spectres en	Bandes prédictives	Fixe =4.5 m	Variable =3.5 m	Variable = 5.5 m
SB4	Réflectance R	1710/1650/1640	0.95	0.19	0.89 [0.870 0.911]
	ln(1/R)	1710/1650/1630	0.95	0.78	0.94 [0.933 0.955]
SB5	Réflectance R	1710/1660/1690	0.55	0.16	0.63 [0.591 0.676]
	ln(1/R)	1710/1660/1690	0.54	0.20	0.64 [0.596 0.680]

Tableau 4-15: Corrélations (r²) et intervalles de confiance à 95% de r² entre les concentrations estimées et réelles de la (a) cellulose, la (b) lignine et des (c) protéines pour une canopée dont le taux de couverture est égal à 25.7%, 47.9% et 67.4% (visée oblique).

Ces résultats diffèrent donc de ceux obtenus avec la variation du LAI. L'explication avancée est que toute variation du LAI modifie de manière non linéaire et différente selon les longueurs d'onde la réflectance du couvert alors que la variation du diamètre des couronnes implique des effets non linéaires beaucoup moins importants.

III.4. Conclusion partielle

L'objectif de cette étude théorique a été d'étudier la fiabilité et la robustesse des équations prédictives de la lignine, cellulose et des protéines établies à partir de mesures de télédétection. Il a été considéré des cas théoriques idéaux: variations des concentrations biochimiques du couvert alors que certaines caractéristiques majeures (teneur hydrique foliaire, etc.) ont été supposées constantes.

L'étude basée sur l'établissement d'équations prédictives sur un paysage de référence a montré que la configuration angulaire d'observation influence la sélection des longueurs d'onde prédictives et des coefficients de régression associés. Ainsi, dans notre cas d'étude, les configurations de rétrodiffusion et spéculaire n'ont pas permis de trouver des régressions satisfaisantes alors que les configurations de visée au nadir et oblique ($\theta_v = 31.2°$ et $\phi_v = 102°$) ont permis l'obtention de relations fiables. Les équations prédictives établies à partir des spectres de dérivées 1ère des réflectances du couvert ont donné des résultats équivalents à ceux des régressions établies à partir des réflectances brutes.

Il est apparu dans un deuxième temps, que les équations prédictives sont très sensibles aux variations du sous-bois et que par conséquent, toute variation d'un paramètre modifiant l'influence du sous-bois (LAI, diamètre des couronnes, etc.) a des répercussions plus ou moins importantes sur les équations prédictives et donc sur l'estimation des concentrations. Par conséquent, l'estimation des concentrations ne peut être fiable que pour des couverts relativement identiques ou dont l'influence du sous-bois est réduite: LAI des parcelles, densité des arbres ou taux de couverture plus forts que pour la maquette de référence. D'autre part, on a pu constater qu'une augmentation de la proportion de signal de télédétection correspondant à des diffusions multiples a tendance à faire chuter les corrélations. C'est le cas dans des configurations angulaires pour lesquelles les surfaces à l'ombre sont importantes.

Il est cependant clair que cette étude est loin d'être complète. Il est nécessaire de poursuivre et d'approfondir ces études systématiques de sensibilité, en particulier avec la prise en compte des effets atmosphériques et pour des directions d'illumination solaire différentes. Il aurait également été intéressant de tester une autre approche qui consiste à établir des équations prédictives non plus à partir d'un paysage de référence (paramètres biophysiques identiques) mais à partir d'un ensemble de parcelles (paramètres biophysiques variables) de manière à ce que les équations prédictives soient suffisamment générales pour être appliquées sur n'importe quelle parcelle présentant un degré d'hétérogénéité inclus dans les parcelles initiales.

Finalement, ce travail illustre bien l'apport potentiel de la modélisation physique pour l'étude par télédétection de la biochimie des couverts forestiers.

IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Des difficultés de diverses natures ont été rencontrées au cours de deux campagnes expérimentales (AVIRIS et ISM) pour analyser le potentiel de la haute résolution spectrale pour l'étude des milieux forestiers: problèmes instrumentaux, corrections atmosphériques, nombre limité d'échantillons foliaires récoltés sur le site d'étude, définition du protocole de

mesures chimiques et spectrométriques le plus adapté (échantillon frais ou réduit à l'état de poudre sèche?), etc. De plus, les résultats obtenus ont montré que les équations prédictives variaient dans le temps, suivant le site d'étude et en fonction des instruments de mesures utilisés.

Le fait d'obtenir des résultats différents entre les deux campagnes (ISM et AVIRIS) nous a conduit à étudier avec la modélisation la sensibilité des équations prédictives de la cellulose, de la lignine et des protéines aux paramètres biophysiques de la canopée et à la direction d'observation.

Il est apparu que les bandes spectrales sélectionnées par régression diffèrent selon les campagnes expérimentales et selon l'étude théorique. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences:

- les équations prédictives des trois composés biochimiques ont été établies d'une part, à partir des spectres de réflectances foliaires (matériau foliaire séché) puis « extrapolées » au niveau du couvert dans le cas des études expérimentales alors qu'elles ont été directement établies à partir des spectres de réflectance de la canopée dans le cas de l'étude théorique.
- Les domaines spectraux considérés sont différents: [800 2400 nm] avec l'expérience ISM et [1300 2400 nm] pour l'étude théorique.
- Les équations prédictives établies dans le cadre de la campagne ISM ont été calculées compte tenu de problèmes d'étalonnage de l'instrument ISM à partir de rapport de réflectances $\frac{R(\lambda)}{R(\lambda_{réf})}$ et non à partir des spectres bruts en $R(\lambda)$.

Les résultats obtenus avec la modélisation sont encourageants et mettent en évidence le possibilité d'estimer des concentrations biochimiques depuis l'espace. Cependant, les équations prédictives établies doivent être utilisées avec une extrême prudence car elles dépendent fortement du site d'étude, de la configuration angulaire d'observation et certainement de la date d'acquisition des données. Compte tenu de l'importance de la chimie des couverts pour modéliser les processus biologiques (photosynthèse, productivité primaire nette, etc.), il semble important de continuer à poursuivre et coupler des études spectrométriques expérimentales et théoriques pour quantifier le potentiel de la « haute résolution spectrale».

CHAPITRE 5

VERS UNE MODÉLISATION «MULTI-ÉCHELLE»

I. INTRODUCTION

Contexte général et position du problème

La capacité de la télédétection spatiale à fournir des observations à différentes échelles d'analyse est un atout majeur et nécessaire pour l'étude de la biosphère continentale. Ceci est en particulier vrai pour les études qui nécessitent la connaissance de paramètres biophysiques et biochimiques sur de grandes surfaces. Dans de nombreux cas, il s'agit d'établir un lien entre des paramètres dits « régionaux » ou à petite échelle et des paramètres dits « à grande échelle », en général mesurés in-situ. Ce problème se pose par exemple pour l'indice foliaire (LAI) et le taux de couverture. Leur signification peut être bien appréhendée sur le terrain mais lors d'analyses avec des données satellitaires, elle est d'autant plus confuse que la résolution spatiale de ces dernières est grossière. Ainsi, utilisé avec des modèles turbides de transfert radiatif pour expliquer la mesure de télédétection, un paramètre tel que le LAI devient souvent un paramètre mathématique dont la signification biophysique diminue avec la résolution spatiale d'analyse.

L'utilisation de modèles de transfert radiatif pour étudier l'information satellitaire multi-résolution nécessite donc des modèles valides à des échelles d'analyse à la fois métriques et kilométriques. Dans ce contexte, la modélisation 3-D du transfert radiatif, combinée à une prise en compte réaliste du milieu étudié, constitue un outil potentiellement très intéressant. La difficulté réside bien évidemment dans le fait que l'on ne peut pas modéliser de la même manière de grandes et de petites scènes, en raison de problèmes de temps de calcul et de volumes de données inhérents aux grandes scènes. Dans le cadre de ma thèse, j'ai abordé ce problème à partir du modèle DART.

Méthodologie de l'approche retenue

Le travail présenté dans ce chapitre est tout à fait prospectif. Il s'agit du développement d'une méthode de modélisation originale, dite « multi-échelle ». Elle consiste en un couplage de 2 modèles de transfert radiatif fonctionnant à différentes échelles d'analyse. Ainsi, un modèle dit à « haute résolution spatiale », c'est-à-dire capable de simuler la BRDF d'un paysage discrétisé avec un pas de l'ordre de 10 cm, calcule les caractéristiques optiques qui servent de paramètres d'entrée à un modèle dit à « basse résolution spatiale », c'est-à-dire capable de simuler la BRDF d'un paysage discrétisé avec un pas supérieur au mètre.

L'objectif de l'approche «multi-échelle» est triple:

1. Obtention de BRDF précises de scènes avec le modèle «basse résolution».
2. Utilisation comme paramètres d'entrée de quantités biophysiques (dimensions des arbres, LAI, taux de couverture, etc.) qui peuvent être mesurées sur le terrain et,
3. Compatibilité avec les moyens informatiques actuels (espace mémoire et temps calcul).

Le couplage de modèles « haute et basse résolution » a été étudié à partir d'une utilisation récursive du modèle DART:

- Dans une première étape, j'ai modifié le modèle DART de manière à calculer les fonctions de transfert (transmittance et fonctions de phase) d'éléments de paysage tels que (1) le sous-bois (cf. §.II.), c'est à dire l'association de petits arbres, herbe et sol et (2) les couronnes des arbres (cf. §.III.). Les dimensions de la cellule élémentaire sont dites «centimétriques», de 10 cm à 1 m.

- Dans une deuxième étape, les fonctions de phase et transmittance calculées pour des éléments représentés par des ensembles de cellules centimétriques deviennent les caractéristiques optiques des cellules « décamétriques » sur lesquelles opère le modèle DART à « basse échelle ». Les cellules décamétriques constituant la scène « basse résolution » sont beaucoup moins nombreuses que les cellules centimétriques qu'il aurait fallu utiliser pour représenter le même paysage. Cette plus grande simplicité est contrebalancée par le fait que la représentation et surtout la prise en compte des propriétés optiques des cellules sont beaucoup plus complexes.

II. SIMULATIONS « MULTI-ECHELLE » DU SOUS-BOIS

II.1. Influence de la discrétisation du sous-bois

D'une manière générale, la simulation de la BRDF d'un couvert est d'autant plus précise que les éléments sont d'autant mieux représentés. Les plus petits « objets » du couvert exercent donc une forte contrainte. Ceci est en particulier le cas du sous-bois pour lequel une bonne représentation implique un sur-échantillonnage des autres éléments tels que les couronnes des arbres, alors que dans certains cas le sous-bois a une influence faible ou négligeable sur la BRDF du couvert.

L'influence de la maille de discrétisation est illustrée ci-dessous avec le cas d'un sous-bois homogène où la végétation est supposée constituée de couches horizontales au-dessus d'un sol lambertien. La simulation d'une grande zone d'étude conduit à représenter le sous-bois par un nombre de couches aussi faibles que possible pour minimiser les contraintes informatiques. En fait, la représentation du sous-bois par un nombre fini de couches n'est pas optimale car elle peut entraîner des erreurs parfois importantes. Ainsi, la figure 5-1 montre que les réflectances DART dans le plan principal, d'un sous-bois composé d'un sol lambertien ($\rho_{sol} = 20\%$) et d'un couvert homogène de végétation ($\rho_f = \tau_f = 10\%$; LAI = 3 ; LAD = sphérique), diffèrent selon le nombre de couches (1 à 20) utilisées. Dans ce cas, la réflectance calculée avec le modèle SAIL sert de référence.

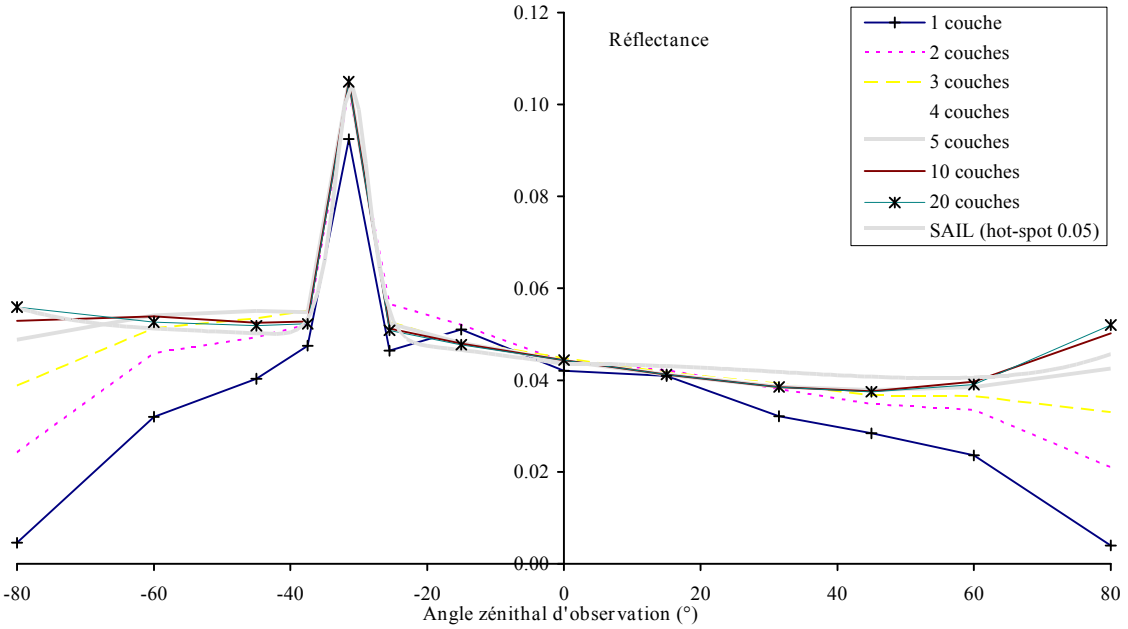


Figure 5-1: Réflectances DART et SAIL (plan principal) d'un sous-bois homogène composé de 1 à 20 couches de végétation au dessus d'un sol lambertien ($_{sol}$ = 20%, $_f$ = $_f$ = 10% et LAI = 3 ; $_s$ = 148.52° et $_s$ = 222°).

Il apparaît que les réflectances DART diffèrent d'autant plus des réflectances SAIL que le nombre de couches pour représenter le sous-bois est faible et que les directions d'observation sont obliques. Cet effet est illustré par la figure 5-2. Il est dû au mode de discrétisation du sous-bois. Ainsi, dans le cas d'un rayonnement incident $W(0,\Omega_s)$ sur une cellule « herbe », un rayon qui devrait être diffusé à partir du « point milieu M_s » (cf. chap. 2) selon la direction (M_sC) et qui devrait ressortir immédiatement du sous-bois est en fait diffusé à partir du centre de la cellule selon la direction (DE). Par conséquent, le rayon traverse donc une ou plusieurs cellules mitoyennes supplémentaires avec de quitter le sous-bois. Cet effet est d'autant plus accentué que les cellules ont une forte densité foliaire. Un moyen de s'affranchir de ces problèmes est de diminuer le plus possible la densité foliaire dans les cellules, ce qui revient à simuler le sous-bois avec beaucoup de couches.

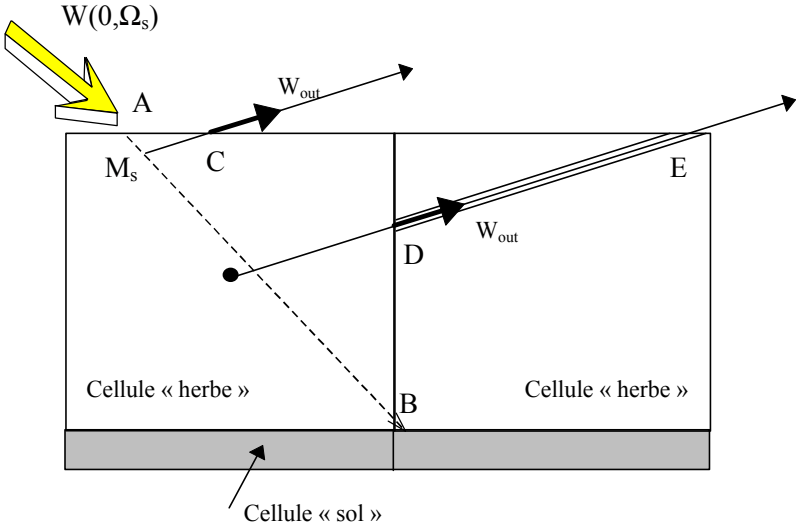


Figure 5-2: Augmentation de l'atténuation des rayons diffusés pour des angles supérieurs à 45° dans le cas d'un couvert représenté par une seule couche foliaire.

Ainsi, les réflectances SAIL et les réflectances DART d'un sous-bois homogène simulé avec un grand nombre de couches (20 couches) sont très voisines (Fig. 5-1). On constate toutefois de petites différences relatives:

- la réflectance DART est légèrement plus forte autour de la direction de rétrodiffusion.
- la réflectance SAIL est un peu plus forte dans les directions $\theta_v \in [0\ 60]$.

Ces différences sont dues au fait que le hot-spot n'est pas simulé de la même manière avec les modèles DART et SAIL (Goel, 1988). Ainsi, dans le modèle SAIL, le « hot-spot » est introduit après calcul de la réflectance du milieu comme un terme correctif dans la direction de rétrodiffusion. Le rayonnement SAIL diffusé dans la direction de rétrodiffusion est donc intercepté, à l'inverse du modèle DART, et rediffusé dans toutes les autres directions, ce qui tend donc à augmenter la réflectance du couvert dans les directions autres que celles du hot-spot. Cet effet survient aussi pour les directions autour de la direction du hot-spot. Dans ce cas, le modèle SAIL calcule la largeur angulaire du hot-spot de manière tout à fait empirique alors que le modèle DART utilise la théorie de Kuusk (1985).

Tous ces résultats soulignent l'importance du rôle joué par le niveau de discrétisation du sous-bois. La solution consistant à discrétiser de manière très fine le sous-bois n'est évidemment pas une solution acceptable dans le cas de paysages étendus compte tenu des contraintes informatiques. Ce problème est encore plus difficile à gérer avec des sous-bois hétérogènes. Ces remarques m'ont conduit à développer une approche originale: dans un

premier temps, les caractéristiques optiques (fonction de phase) d'un « échantillon typique » de sous-bois sont calculées, puis utiliser dans une deuxième étape, pour le calcul de la réflectance de scènes de grandes dimensions. Cette approche est présentée ci-dessous avec le cas d'un sous-bois quelconque pouvant être constitué de petits arbres, herbe, etc.

II.2. Étape 1: Fonction de phase du sous-bois $T_{SB}(\Omega_s,\Omega_v)$

Le modèle DART a été modifié de manière à calculer la fonction de phase $T_{SB}(\Omega_s,\Omega_v)$ d'éléments « complexes » comprenant du sol, de l'herbe, des arbustes, etc. Les modifications apportées au modèle DART concernent essentiellement les étapes d'illumination et de récupération du rayonnement diffus sortant du bloc « sous-bois » (Fig. 5-3). Le calcul de $T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ pour un bloc « sous-bois » de type j correspond à la détermination d'une matrice N×N, où N est le nombre de directions discrètes de l'espace (4π). Deux blocs de type j et j' se différencient par la structure géométrique et/ou les caractéristiques optiques de leurs éléments (sol, éléments foliaires, etc.). Seuls les éléments de cette matrice correspondant à la fois à des directions incidentes (Ω_s) descendantes et à des directions de diffusion (Ω_v) montantes sont non nuls:

$$T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v) \neq 0 \text{ si } \quad _s \in [90\ \ 180°] \text{ et } \quad _v \in [0\ \ 90°].$$

A l'intérieur d'un bloc « sous-bois », les mécanismes d'interaction électromagnétiques associés aux différents types de cellules (sol, végétation, tronc, etc.) sont simulés comme avec le modèle DART. De plus, le bloc « sous-bois » est, comme dans le modèle DART, assimilé à un paysage répétitif infini. Ci-dessous, les dimensions du bloc « sous-bois » sont indiqués par les termes ΔX, ΔY et ΔZ alors que les dimensions des cellules élémentaires sont indiqués par Δx, Δy et Δz.

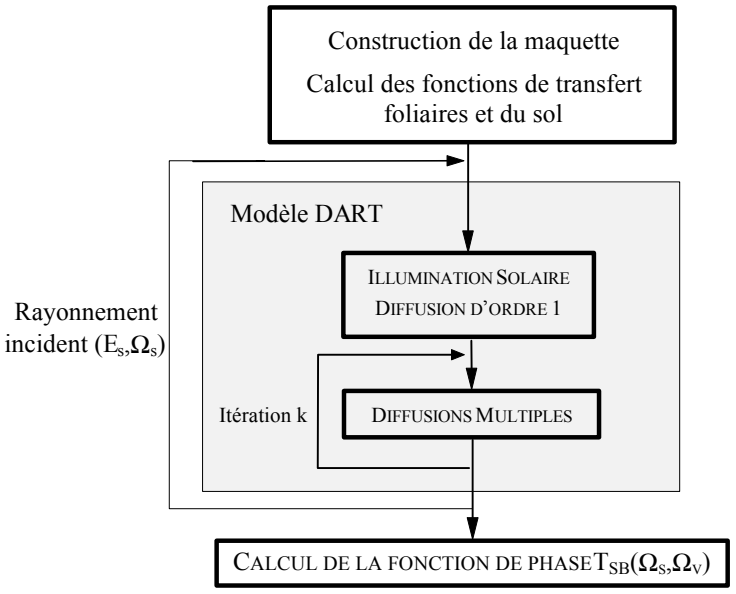


Figure 5-3:

Algorithme pour le calcul de la fonction de phase d'un bloc « sous-bois ».

Les éléments de la fonction de phase $T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ sont égaux à la somme des vecteurs puissance $\sum_{i=1}^{i=\frac{\Delta X.\Delta Y}{\Delta x.\Delta y}} W_{out}(i, z=\Delta Z, \Omega_v)$ qui sortent du bloc « sous-bois » par les cellules i de la couche supérieure dans la direction (Ω_v).

$$T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\sum_{i=1}^{i=\frac{\Delta X.\Delta Y}{\Delta x.\Delta y}} W_{out}(i, z=\Delta Z, \Omega_v)}{\sum_{i=1}^{i=\frac{\Delta X.\Delta Y}{\Delta x.\Delta y}} W_s(i, z=\Delta Z, \Omega_s)}$$

où $\sum_{i=1}^{i=\frac{\Delta X.\Delta Y}{\Delta x.\Delta y}} W_s(i, z=\Delta Z, \Omega_s)$ est l'éclairement total du bloc dans la direction (Ω_s). Cette quantité est égale à l'énergie interceptée par le bloc. L'éclairement initial $W_s(z=\Delta Z, \Omega_s)$ étant constant pour toutes les cellules de la couche supérieure, $T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ peut s'écrire plus simplement:

$$T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\Delta x.\Delta y. \sum_{i=1}^{i=\frac{\Delta X.\Delta Y}{\Delta x.\Delta y}} W_{out}(i, z=\Delta Z, \Omega_v)}{\Delta X.\Delta Y. W_s(z=\Delta Z, \Omega_s)}$$

II.3. Étape 2: Utilisation de la fonction de phase $T_{SB}(\Omega_s,\Omega_v)$

Dans cette deuxième étape, le modèle DART utilise la fonction de phase $T_{SB}(\Omega_s,\Omega_v)$ indiquée ci-dessus pour déterminer la BRDF d'une large scène. Le bloc « sous-bois » est assimilé à une « surface opaque » de caractéristiques optiques représentées par $T_{SB}(\Omega_s,\Omega_v)$. Les mécanismes d'interactions physiques du rayonnement entre la canopée et le bloc sont donc surfaciques.

L'expression des flux diffusés par une cellule de type « sous-bois » dépend de l'ordre d'itération et du nombre N de rayons qui interagissent avec la cellule.

⇒ Itération k=1: $(\Omega_s)=(\Omega_{sun})$

$$W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{in}(0,\Omega_s) = T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v).\sum_{n=1}^{N} W_{in}(0,\Omega_s)$$

⇒ Itération k>1: $W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} T_{SB}(j,\Omega_{n(n)},\Omega_v).W_{in}(0,\Omega_{n(n)})$

II.4. Validation

La figure 5-6 présente les réflectances obtenues dans le plan principal d'une plantation de pins (Fig. 5-4, 5-5) caractérisée par:

- Tronc: hauteur $H_{tronc} = 6 \pm 0.5$ m,
  diamètre $\varnothing_{tronc} = 0.25$ m,
  réflectance $\rho_{tronc} = 5\%$
- Houppier: forme ellipsoïdale,
  hauteur $H_{houp} = 6 \pm 0.5$ m,
  diamètre $\varnothing_{houp} = 5 \pm 0.5$ m,
  LAD = sphérique,
  réflectance et transmittance foliaire $\rho_f = \tau_f = 10\%$
- LAI de la canopée: LAI = 2.5

Six sous-bois ont été testés.

- Sous-bois « sol noir » 0: (ρ_{sol} = 0%).
- Sous-bois « foliaire homogène » 1: sol lambertien (ρ_{sol} = 20%) et 1 couche homogène de végétation ($\rho_f = \tau_f$ = 10% - LAI = 3) de densité foliaire μ = 3.
- Sous-bois « foliaire homogène » 2: sol lambertien (ρ_{sol} = 20%) et 10 couches homogènes de végétation ($\rho_f = \tau_f$ = 10% - LAI = 3) dedensité foliaire μ = 0.3.
- Sous-bois « multi-échelle foliaire homogène » 3: sous-bois de type 2 représenté par une fonction de phase.
- Sous-bois « foliaire hétérogène » 4: sol lambertien de réflectance variable (ρ_{sol} = 20 ± 5%) avec de petits arbres ($\rho_f = \tau_f$ = 10% - H= 1.5m - LAI = 3).
- Sous-bois « multi-échelle foliaire hétérogène » 5: sous-bois de type 4 représenté par une fonction de phase.

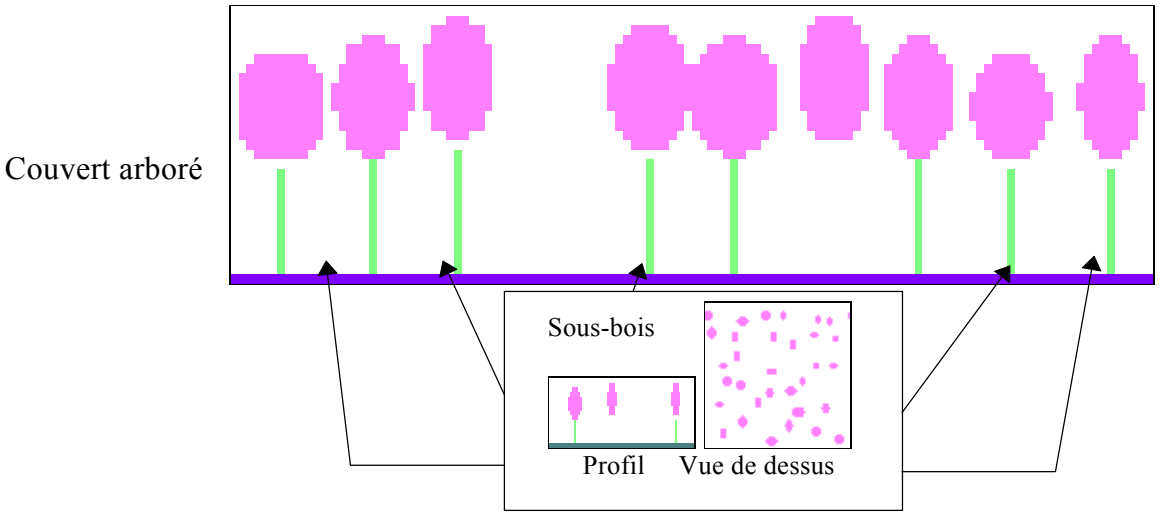
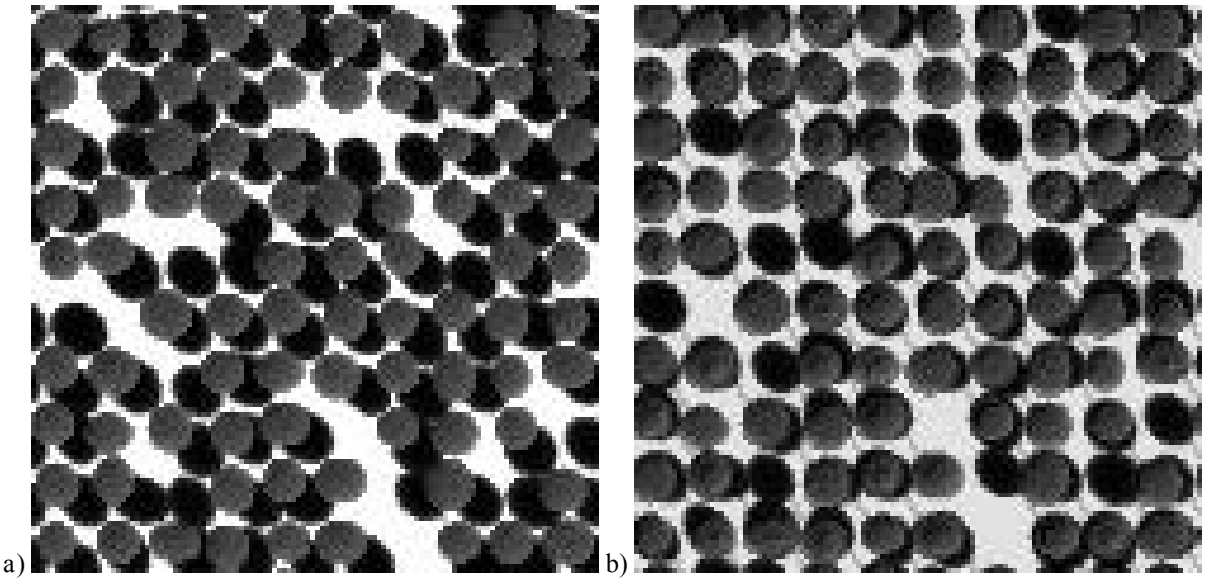


Figure 5-4: Représentation simplifiée d'une plantation de pins comprenant un couvert arboré et un sous-bois. La petite figure représente les vues de profil et de dessus du sous-bois.



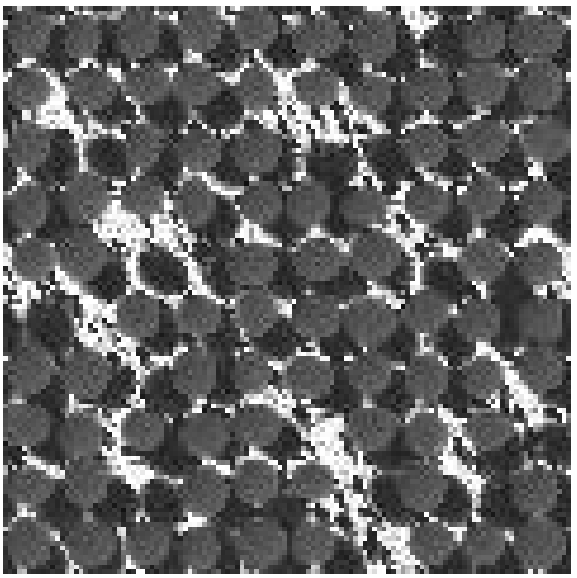
c) 

Figure 5-5: Simulations DART d'une plantation de pins pour plusieurs angles zénithaux d'observation dans le plan principal (a) et (c) $_v = 0°$ et (b) $_v = 15°$. Le sous-bois a été simulé avec l'approche « multi-échelle » (a) et (b) et de manière « exacte » (c).

La figure 5-6 fait apparaître que:

- les réflectances du couvert dépendent beaucoup du sous-bois. Il est donc très important de bien prendre en compte son hétérogénéité spatiale, structurale et spectrale. Toutefois, pour les directions très obliques, le sous-bois joue un rôle mineur: les réflectances des couverts tendent à s'égaliser et deviennent proches de la réflectance du couvert avec un sol de réflectance nulle. En effet, pour ces directions, le couvert arboré «masque » le sous-bois.
- les réflectances DART R_1 et R_2 des couverts avec respectivement un sous-bois homogène 1 et 2 sont similaires excepté à la verticale ($R_1 < R_2$) et dans les directions proches de la rétrodiffusion ($R_2 < R_1$). A la verticale, cet effet est expliqué par le fait que la réflectance du sous-bois homogène « 1 couche » est inférieure à la réflectance du sous-bois homogène « 10 couches » (Fig. 5-7). L'effet inverse observé dans les directions proches de la rétrodiffusion peut être expliqué par la discrétisation du paysage et des flux: toute cellule du sous-bois « 1 couche » induit un flux unique dont l'interception diffère en général de celle des N flux dûs aux N cellules superposées d'un sous-bois «N couches».
- les réflectances du couvert avec un sous-bois hétérogène 4 sont très différentes des simulations avec un sous-bois homogène (pic du « hot-spot » plus fort et élargi, réflectance en général plus importante excepté dans les directions très obliques). Le maximum local pour $\theta_v = 15°$ est dû au fait que selon cette direction la proportion de sol observée est maximale. Elle est égale à 15.1% à la verticale et 19.3% pour $\theta_v = 15°$. Ce cas d'étude illustre l'importance de la prise en compte de la BRDF du sous-bois quand le couvert arboré dominant n'est pas trop dense.
- les réflectances du couvert comprenant les sous-bois 3 ou 5, caractérisés par une fonction de phase pré-calculée (procédure « multi-échelle »), sont similaires aux réflectances DART du même couvert directement simulées en prenant en compte les caractéristiques structurales et optiques du sous-bois. Cette constatation met en évidence l'utilité de la procédure « multi-échelle ». En utilisant des fonctions de phase pré-calculées, les temps de calcul sont fortement diminués car le nombre d'éléments de la scène est très réduit. Cette réduction est due à 2 effets. D'une part, le

sous-bois est représenté par une couche unique de cellules et d'autre part, la maille d'échantillonnage de la scène est plus grossière car les éléments du couvert arboré ont en général des dimensions supérieures à celles des éléments du sous-bois.

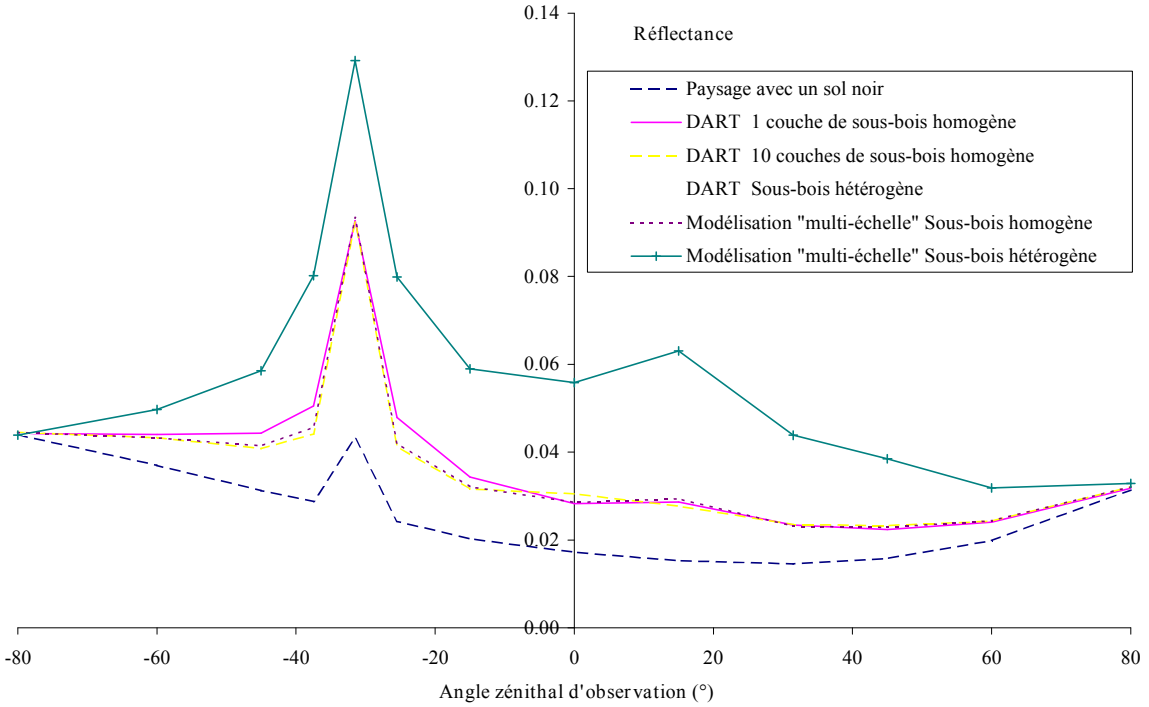


Figure 5-6: Profil de BRDF d'une plantation dans le plan principal simulée avec différents sous-bois.

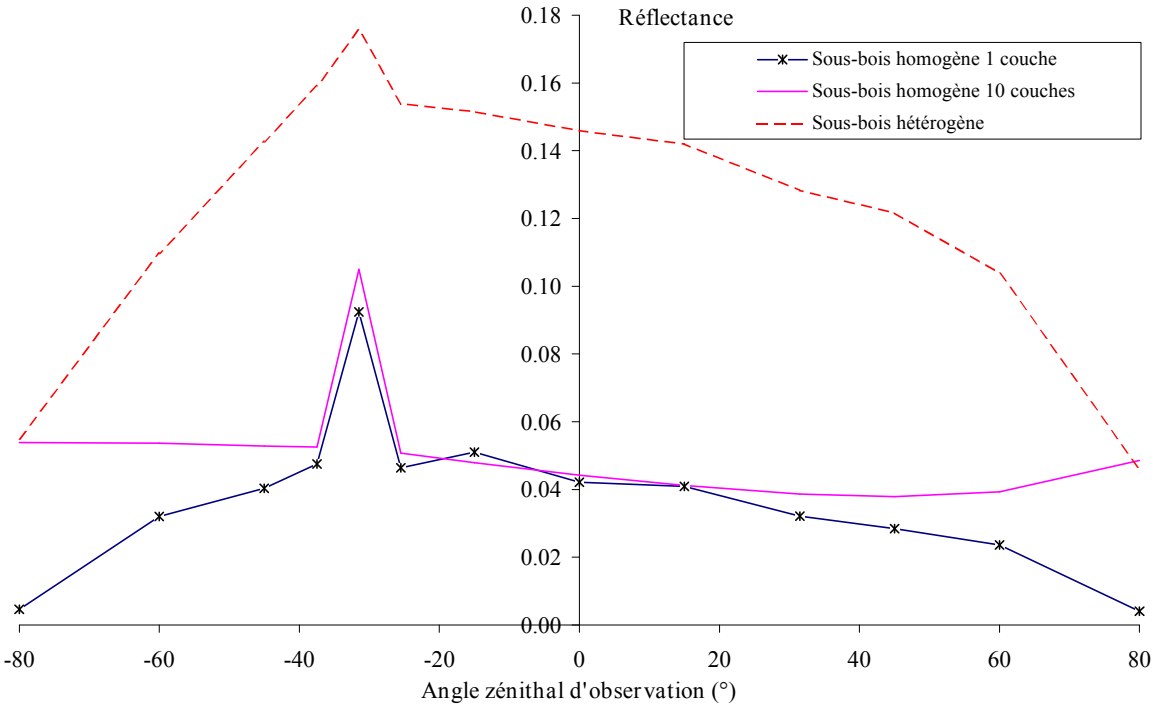


Figure 5-7: BRDF de sous-bois. La réflectance du sous-bois hétérogène est beaucoup plus élevée que celle des sous-bois homogènes. Cet effet est expliqué par la forte réflectance du sol qui est beaucoup mieux perçu dans le cas d'un sous-bois hétérogène que dans le cas d'un sous-bois homogène.

En conclusion, l'influence des propriétés optiques et géométriques du sous-bois sur la BRDF de couverts peut être simulée à partir de simples fonctions de phase. Cette approche est beaucoup plus adaptée que l'approche DART classique pour étudier de plus grandes scènes.

III. SIMULATIONS « MULTI-ECHELLE » DES HOUPPIERS

III.1. Présentation du problème

Après avoir simulé le sous-bois en tant que surface caractérisée par une fonction de phase, j'ai étudié la possibilité de simuler tout élément du paysage en tant que cellule individuelle caractérisée par un nombre limité de paramètres optiques. Pour cela, j'ai considéré le cas particulier, mais très important des couronnes des arbres. Les principaux objectifs sont: (1) simulation aussi exacte que possible de la BRDF du couvert à partir de représentation «macroscopique» des houppiers et (2) représentation simplifiée des houppiers:

- simulation réaliste de la BRDF du couvert: ceci m'a conduit à considérer les cellules macroscopiques « couronne » comme des éléments donnant lieu à des mécanismes d'interaction de volume et à des phénomènes d'ombre. Pour cela, j'ai considéré qu'un rayon incident sur une cellule macroscopique « couronne » est partiellement intercepté, transmis et diffusé. J'ai adopté la solution consistant à représenter la cellule macroscopique « couronne » par une fonction de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$ et une fonction de transmittance$T_{Houp}(\Omega_s)$.
- représentation « simplifiée » des houppiers: de manière à prendre en compte la diversité des houppiers, j'ai considéré un nombre J de types de houppiers, chacun étant caractérisé par un couple de fonctions ($T_{Houp}(\Omega_s)$, $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$). Ainsi, il apparaît par exemple, que les houppiers caractérisés par des distributions angulaires foliaires différentes appartiennent à des types différents. D'autre part, la surface foliaire S_f étant une caractéristique de chaque houppier, j'ai considéré que chaque houppier « macroscopique » i est caractérisé par $[S_f(i(j)),T(j,\Omega_s,\Omega_v),T(j,\Omega_s)]$ où i(j) appartient à [1 I(j)] avec I le nombre total de houppiers de type j.

Les différentes étapes nécessaires à la simulations de la BRDF du couvert à partir de houppiers caractérisés par les triplets $[S_f(i(j)),T(j,\Omega_s,\Omega_v),T(j,\Omega_s)]$ sont décrites ci-dessous.

III.2. Etape 1: Fonctions de transmittance $T_{Houp}(\Omega_s)$ et de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$ de houppier

Le modèle DART a été modifié de manière à calculer les fonctions moyennes de transmittance $T_{Houp}(\Omega_s)$ et de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$ de couronnes d'arbres. Dans cette étape, dite « à haute résolution spatiale », les houppiers sont représentés très précisément: forme (ellipsoïde, cône, parallélépipède, etc.) et dimensions, densité foliaire, inclinaison et propriétés spectrales des éléments foliaires, etc.

Les adaptations spécifiques apportées au modèle DART concernent les étapes d'illumination et de récupération du rayonnement diffus sortant du houppier ; les processus physiques de diffusion restent identiques. Les dimensions de la cellule élémentaire sont inférieures ou égales à 1 m.

Contrairement au modèle DART original où l'illumination de la scène se fait par la face supérieure, les houppiers peuvent être éclairés par trois faces (face supérieure ou inférieure et 1 ou 2 faces latérales) en fonction de la configuration angulaire (Ω_s) du rayonnement incident. Le rayonnement incident est assimilé comme dans le modèle DART, à une multitude de flux incidents pénétrant dans le houppier par toutes les cellules élémentaires des 1, 2 ou 3 faces (Fig. 5-8).

Les houppiers ne correspondent plus comme dans le modèle DART, à un paysage infini. Tout rayonnement qui sort de la couronne est stocké en tant que rayonnement diffusé ou transmis par le houppier.

Le calcul de fonctions de transmittance $T_{Houp}(\Omega_s)$ et de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$ des couronnes d'arbres est effectué en éclairant le houppier suivant les N directions discrètes de l'espace (4π) et en considérant les valeurs moyennes obtenues.

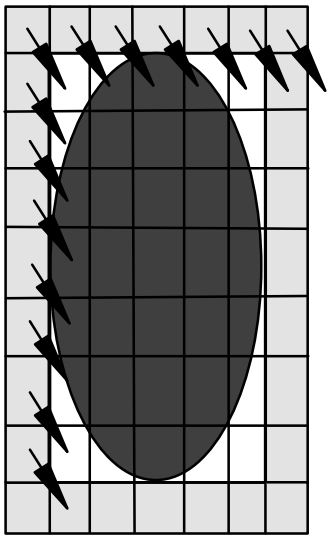


Figure 5-8:
Représentation schématique de l'éclairement d'un houppier ellipsoïdal. Les cellules situées sur la partie externe de la maquette et représentées ici en grisé clair ne correspondent pas à la scène mais aux cellules « source » du rayonnement. La présence ou l'absence de flèche indique si la cellule émet ou non un rayonnement incident.

III.2.1. Fonction de transmittance $T_{Houp}(\Omega_s)$

La fonction moyenne de transmittance $T_{Houp}(\Omega_s)$ indique la proportion de rayonnement transmis par le houppier par rapport au rayonnement incident selon la direction (Ω_s). Le calcul de $T_{Houp}(j,\Omega_s)$ pour un houppier de type j correspond à la détermination d'un vecteur de dimension N, où N est le nombre de directions discrètes de l'espace (4π).

$$T(j,\Omega_s) = \frac{\sum W_{out}(\Omega_s)}{\sum_p W_{in}(p,\Omega_s)} = \frac{\sum W_{out}(\Omega_s)}{W_{in}(\Omega_s).\sum_p \left|\Omega_s.\Omega_p\right|}$$

où $\sum W_{out}(\Omega_s)$ est le flux total transmis selon (Ω_s) par les éléments foliaires du houppier,

p est un indice qui caractérise les cellules «sources actives» (Fig. 5-8),

(Ω_p) est la direction de la normale de la cellule p,

$W_{in}(p,\Omega_s)$ est le flux incident (Ω_s) sur la cellule p. Il est égal à un flux constant $W_{in}(\Omega_s)$ pondéré par la surface efficace $\left|\Omega_s.\Omega_p\right|$ de la cellule d'entrée. Ainsi, dans le cas d'un rayonnement incident descendant quasi vertical, les flux incidents à partir des cellules « source » des parois verticales sur les bords de la maquette jouent a priori un rôle beaucoup moins important que les flux incidents à partir des cellules «source » de la face supérieure.

III.2.2. Fonction de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$

La fonction moyenne de phase $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$ indique la proportion de rayonnement incident selon la direction (Ω_s) qui est diffusé dans la direction (Ω_v). Le calcul de

$T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ pour un houppier de type j correspond à la détermination d'une matrice N×N, où N est le nombre de directions discrètes de l'espace (4π).

$$T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\sum W_{out}(\Omega_v)}{\sum W_{int}(\Omega_s)}$$

où $\sum W_{out}(\Omega_v)$ est le flux diffusé par les éléments foliaires du houppier dans la direction (Ω_v), et $\sum W_{int}(\Omega_s)$ est le flux total intercepté par les éléments foliaires du houppier, soit $(1 - T(j,\Omega_s)).W_{in\,total}(\Omega_s)$. $W_{int}(\Omega_s)$, $W_{out}(\Omega_v)$ et $W_{in\,total}(\Omega_s)$ sont calculés en considérant que les flux incidents sont pondérés par la section efficace $|\Omega_s.\Omega_p|$ de chaque cellule interceptrice.

La figure 5-9 présente les fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ de houppiers de formes très schématiques: cube (a,c) et sphère (b,d) de dimensions 11 m avec des éléments foliaires de réflectances et transmittances hémisphériques de 10% et d'inclinaison angulaire de type sphérique (a,b) et planophile (c,d). L'indice foliaire est 3 et la direction d'illumination est la verticale. La figure 5-10 présente les profils de ces fonctions de phase dans le plan principal.

Il apparaît que les fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ dépendent de l'inclinaison angulaire foliaire et de la forme des houppiers:

- Distribution angulaire foliaire: $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ est plus forte pour une distribution angulaire foliaire planophile que pour une distribution sphérique, pour les configurations d'observation proches de la verticale, c'est à dire dans le cas où toutes les radiations s'échappent du houppier par la face supérieure. L'analogie avec un milieu homogène infini horizontal montre que la fonction de phase d'ordre 1 est en effet proche de:

$$[1 - e^{-2*LAI}].\frac{1}{\pi}.\cos(\theta_v) \qquad \text{si LAD = planophile}$$

$$[1 - e^{-\frac{1}{2}*LAI*(1+\frac{1}{\cos(\theta_v)})}].\frac{1}{\pi}.\frac{1}{2}.\frac{\cos(\theta_v)}{1+\cos(\theta_v)} \qquad \text{si LAD = sphérique}$$

  Il apparaît que pour un éclairement descendant vertical et une direction d'observation à la verticale montante, la surface efficace d'interception des éléments foliaires est plus importante dans le cas d'une distribution planophile. La tendance indiquée est en fait très diminuée en raison des diffusions multiples. D'autre part, la figure 5-10 indique que la diffusion vers des directions de plus en plus obliques chute plus vite pour un couvert planophile que pour un couvert sphérique. La section efficace foliaire de diffusion est en effet, plus importante dans le cas sphérique que dans le cas planophile pour des directions très obliques. Pour une distribution foliaire strictement horizontale, la diffusion d'un rayonnement incident vertical est nulle à l'horizontale.

- Forme des houppiers: $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ est plus fort que pour des houppiers cubiques que pour des houppiers sphériques. Ceci est expliqué par le fait que dans le cas d'un houppier cubique, le rayonnement intercepté tend à être distribué sur un nombre plus important de cellules, c'est-à-dire par une section d'interception foliaire plus importante, ce qui se traduit par une efficacité de diffusion plus importante (Tableau 5-1): pour un même flux intercepté, la diffusion est plus importante.

	Houppier cubique		Houppier sphérique	
LAD	sphérique	planophile	sphérique	planophile
Transmittance	0.19	0.06	0.32	0.24

Tableau 5-1: Transmittances de houppier cubique et sphérique pour des LAD sphériques et planophiles.

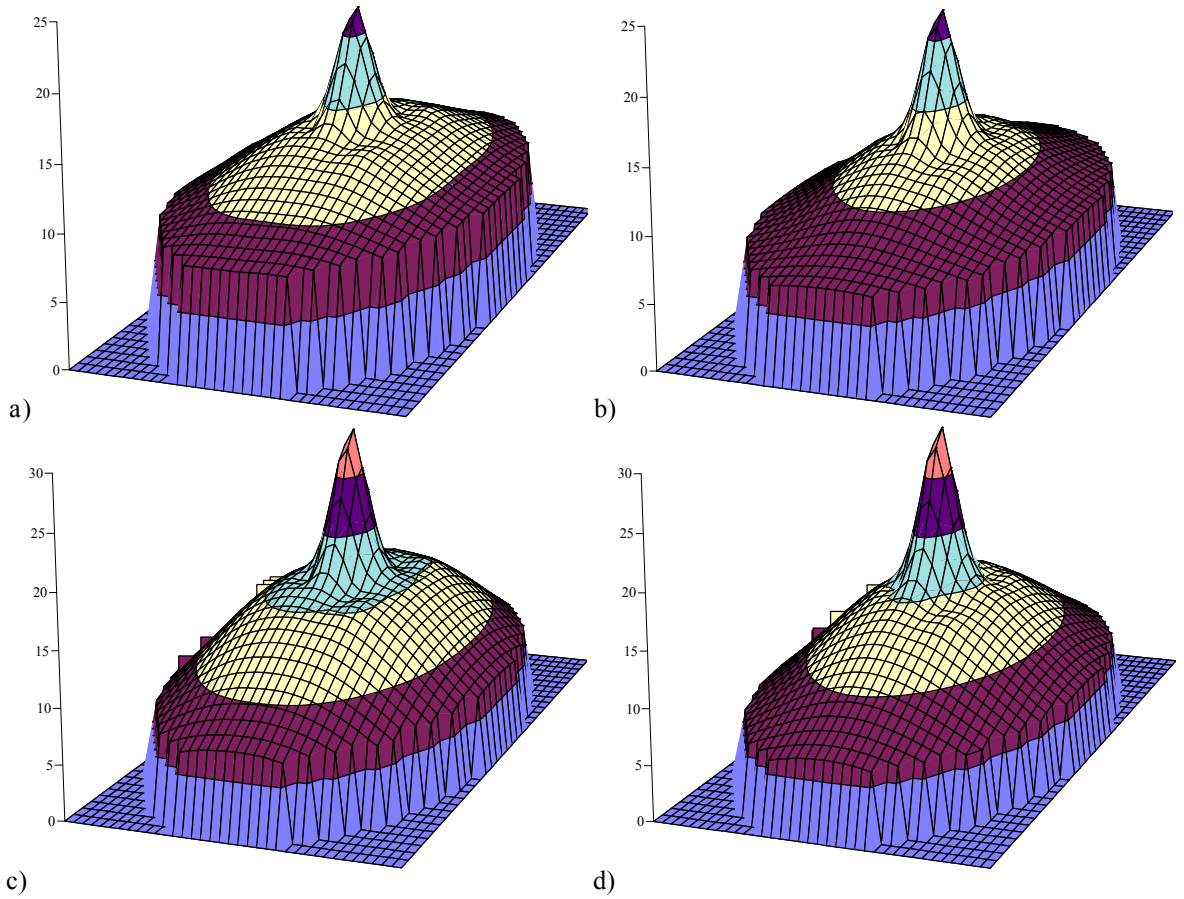


Figure 5-9: Fonctions de phase $T_{Houp}(j, \ _s, \ _v)/ \ _v$ de houppiers de forme cubique (a,c) et sphérique (b,d). Les éléments foliaires ont une réflectance et transmittance de 10% et l'inclinaison des feuilles est de type sphérique (a,b) et planophile (c,d). L'indice foliaire est 3 et la direction d'illumination est la verticale.

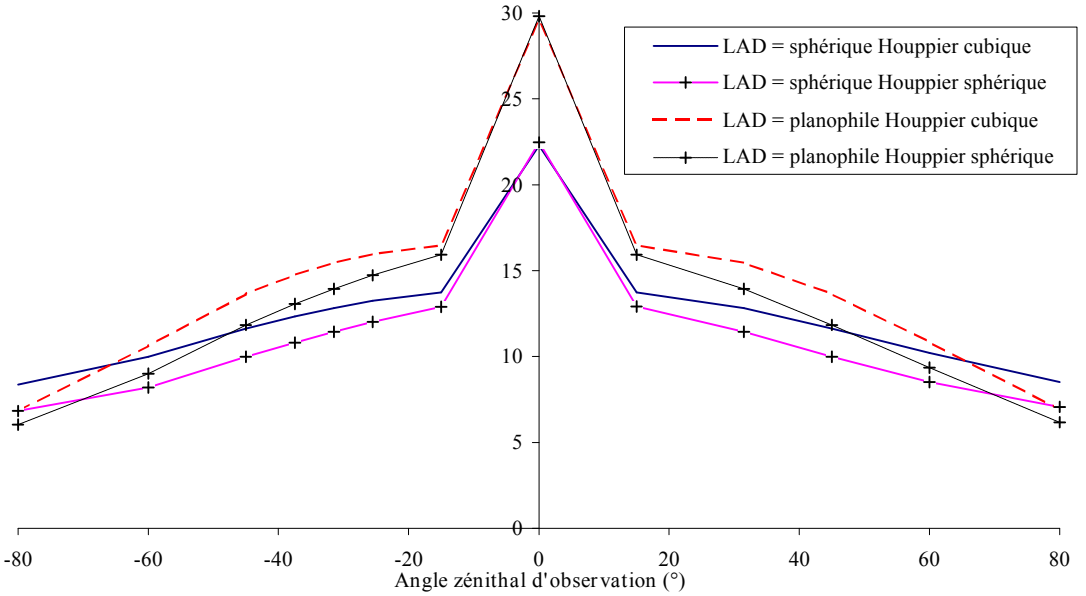


Figure 5-10: Profil des fonctions de phase des houppiers de la figure 5-9 dans la plan principal.

La figure 5-11 illustre le cas d'une illumination oblique (θ_s = 148.52° et ϕ_s = 222°). Il apparaît que les fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ sont du même ordre de grandeur que pour une illumination à la verticale. On retrouve également le fait que les fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ calculées avec une distribution foliaire sphérique sont inférieures à celles calculées avec une distribution planophile et que cette tendance s'inverse pour des angles de diffusion très obliques. D'autre part, la figure 5-11 montre que les fonctions de phase $T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ des houppiers de forme cubique tendent à présenter un minimum local pour θ_v = 0°. Cet effet n'est pas observé dans le cas des houppiers de forme sphérique. Il est expliqué par le fait qu'à la verticale, la section efficace de diffusion des houppiers cubiques présente un minimum local. Dans le cas des houppiers sphériques, la section efficace de diffusion est constante et égale à $\pi.R^2$ où R est le rayon de la sphère.

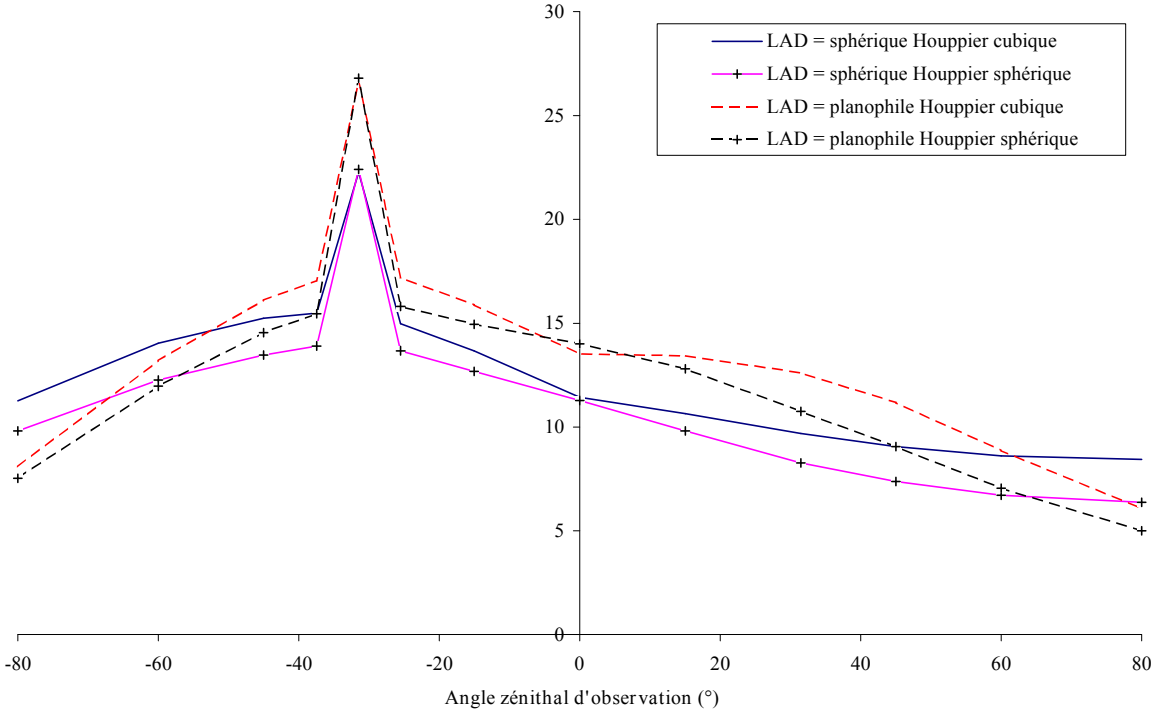


Figure 5-11: Profil des fonctions de phase $T_{Houp}(j, \Omega_s, \Omega_v)/\Omega_v$ de houppiers de la figure 5-9 dans la plan principal pour une illumination oblique (Ω_s = 148.52° et Ω_s = 222°).

III.3. Étape 2: Calcul « multi-échelle » de BRDF de scènes

Cette deuxième étape a pour objectif d'utiliser les fonctions de transfert des houppiers $T_{Houp}(\Omega_s)$ et $T_{Houp}(\Omega_s,\Omega_v)$, pour calculer la BRDF de grandes scènes. Le modèle DART a été modifié de manière à prendre en compte les caractéristiques optiques des cellules « houppier ». Les principales phases (illumination, itérations pour les différents ordres de diffusion, calcul du la BRDF) du modèle DART ont été conservées. Les mécanismes d'interactions physiques du rayonnement avec les cellules « houppier » sont de type volumiques. Le caractère tout à fait prospectif de cette étape explique que seuls les approches et résultats préliminaires soient indiqués.

Le travail présenté ci-dessous est tout à fait préliminaire. Plusieurs méthodes de simulation du rayonnement transmis et diffusé ont été développées et testées. La validité des résultats obtenus illustre le caractère prospectif de mon approche.

III.3.1. Méthodes de calcul des flux transmis par une cellule « houppier »

Quatre méthodes ont été utilisées pour calculer les flux transmis par les cellules « houppier ». Elles ont été testées sur des scènes comprenant des houppiers de différentes natures (formes, densité foliaire et distribution angulaire foliaire).

- Méthode 1: Transmittance moyenne

Le flux transmis par une cellule de type « houppier » est toujours supposé proportionnel à la fonction de transmittance moyenne $T_{Houp}(j,\Omega_s)$. Ainsi, le rayonnement transmis est:

$$W_{out}(\Omega_s) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s).W_{in}(n,\Omega_s) = T_{Houp}(j,\Omega_s).\sum_{n=1}^{N} W_{in}(n,\Omega_s)$$

où N est le nombre de rayons qui interceptent la cellule.

Cette méthode ne tient pas compte de la longueur d'interception dans la cellule « houppier » et accorde donc la même «importance» à tous les rayons.

$$T_{Houp}(j,\Omega_s) = \frac{W_{out}(\Omega_s)}{\sum_{n=1}^{N} W_{in}(n,\Omega_s)}$$

- Méthode 2: Transmittance et longueur géométrique moyenne de transmittance

La méthode 2 considère que la transmittance moyenne $T_{Houp}(j,\Omega_s)$ d'un houppier calculée dans l'étape 1 est égale à la transmittance d'un flux dont la longueur de traversée dans le houppier est la longueur géométrique moyenne $\Delta l_{géom}$ de traversée d'une «macro» cellule selon la direction (Ω_s):

$$T_{Houp}(j,\Omega_s) = \exp(-K'.\Delta l_{géom}) \quad (1)$$

où K' est le «coefficient d'extinction équivalent» du houppier.

La longueur géométrique moyenne $\Delta l_{géom}$ pour une cellule parallélépipédique est donnée par:

$$\Delta l_{géom} = \frac{V}{\sum S_{eff}} = \frac{\Delta x.\Delta y.\Delta z}{S_x + S_y + S_z}$$

où $\sum S_{eff}$ est la somme des surfaces efficaces des trois faces de la cellule:

$$S_x = \Delta y.\Delta z.\left|\sin\ _s.\cos\ _s\right|$$
$$S_y = \Delta x.\Delta z.\left|\sin\ _s.\sin\ _s\right|$$
$$S_z = \Delta x.\Delta y.\left|\cos\ _s\right|$$

Dans le cas où un flux traverse une cellule « houppier » sur une longueur quelconque Δl, la transmittance est donnée par:

$$T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l) = \exp(-K'.\Delta l) \quad (2)$$

L'égalité des coefficients K' entre les équations (1) et (2) implique que:

$$\boxed{T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l) = T_{Houp}(j,\Omega_s)^{\frac{\Delta l}{\Delta l_{géom}}}}$$

Ainsi, le flux transmis par une cellule «houppier» est:

$$W_{out}(\Omega_s) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l(n)).W_{in}(\Omega_s) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s)^{\frac{\Delta l(n)}{\Delta l_{géom}}}.W_{in}(\Omega_s)$$

Cette méthode semble plus adaptée que la méthode précédente car elle corrige la transmittance en fonction de la longueur de traversée des rayons à l'intérieur des cellules «houppier».

- Méthode 3: Transmittance et longueur moyenne de transmittance (K variable)

Cette méthode considère, comme dans la méthode 2, que la transmittance moyenne $T_{Houp}(j,\Omega_s)$ est de la forme:

$$T_{Houp}(j,\Omega_s) = \exp(-K'.\Delta l') \quad (3)$$

où, par contre, $\Delta l'$ est une longueur de transmittance moyenne et K', le coefficient d'extinction équivalent, est calculé dans l'étape 1 par dichotomie, de telle sorte qu'il vérifie:

$$T_{Houp}(j,\Omega_s) = \frac{\sum_{n}^{N} \exp(-K'.\Delta l(n))}{N}$$

où N est le nombre de rayons interceptés par le houppier et Δl est la longueur d'interception de chaque rayon.

Ainsi, la longueur de transmittance moyenne est donnée par:

$$\Delta l' = -\frac{\ln(T_{Houp}(j,\Omega_s))}{K'}$$

Dans le cas d'une longueur de traversée quelconque Δl, le calcul de la transmittance devient:

$$T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l) = \exp(-K'.\Delta l) \quad (4)$$

L'égalité des coefficients K' entre les équations (3) et (4) montre que:

$$\boxed{T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l) = T_{Houp}(j,\Omega_s)^{\frac{\Delta l}{\Delta l'}}}$$

Le flux transmis par une cellule «houppier» est ainsi donné par:

$$W_{out}(\Omega_s) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l(n)).W_{in}(\Omega_s) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s)^{\frac{\Delta l(n)}{\Delta l'}}.W_{in}(\Omega_s)$$

- Méthode 4: Transmittance et longueur moyenne de transmission (K constant)

La méthode 4 considère contrairement aux méthodes 2 et 3 que le facteur K reste constant lorsque l'on passe des cellules «feuille» aux cellules «houppier»:

$$T_{Houp}(j,\Omega_s) = \exp(-K.<\Delta l>) \quad (4)$$

Par conséquent, la longueur moyenne de transmission $<\Delta l>$ est:

$$<\Delta l> = -\frac{\ln(T_{Houp}(j,\Omega_s))}{K}$$

La transmittance pour une longueur de propagation quelconque Δl est:

$$\boxed{T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l) = T_{Houp}(j,\Omega_s)^{\frac{\Delta l}{<\Delta l>}}}$$

et le flux transmis par une cellule «houppier» est:

$$W_{out}(\Omega_s) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s,\Delta l(n)).W_{in}(\Omega_s) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s)^{\frac{\Delta l(n)}{<\Delta l>}}.W_{in}(\Omega_s)$$

L'intérêt de cette méthode est que d'une part, on applique une correction sur la transmittance en fonction de la longueur de traversée du rayon dans la cellule « houppier » comme avec les méthodes 2 et 3 et d'autre part, on conserve le coefficient d'extinction équivalent K identique à celui des cellules « feuille » : $K = G(j_f,\Omega_s).u_f$, où $G(j_f,\Omega_s)$ est la surface efficace des éléments foliaires de type j_f dans la direction (Ω_s) et u_f est la densité foliaire.

III.3.2. Phase d'illumination solaire et rayonnement intercepté:

Comme dans le modèle DART (cf. chapitre 2), tous les flux incidents du rayonnement solaire ont pour origine les cellules « vide » au-dessus de la plus haute couche de la scène. Les éléments du paysage, en particulier les houppiers, étant représentés dans cette étape avec très peu de cellules, le nombre de rayons interceptés par ces éléments est très faible. Les cellules de houppiers ne sont pas éclairées de manière uniforme. L'estimation du rayonnement intercepté est de ce fait biaisé ; le calcul étant effectué à partir de la fonction de transmission moyenne. Les premiers résultats obtenus ont mis en évidence ce problème. De manière à diminuer son importance, sans trop modifier la structure du modèle DART, j'ai simulé le rayonnement solaire incident en considérant que celui-ci provient de cellules « vide » de plusieurs couches situées au-dessus de la couche supérieure de la scène. Cette approche permet d'augmenter le nombre de rayons incidents et donc d'uniformiser un peu la distribution.

La figure 5-12 présente l'erreur relative entre le rayonnement intercepté par un houppier de forme cubique simulé avec le modèle DART à haute résolution spatiale et avec l'approche « multi-échelle » en fonction du nombre de couches utilisées pour simuler le rayonnement solaire. La configuration d'illumination est θ_s = 148.52° et ϕ_s = 222°. Le houppier a une densité foliaire de 0.3 et une distribution angulaire foliaire sphérique.

On constate que les différentes méthodes de calcul du rayonnement transmis donne des résultats différents. Dans tous les cas, l'erreur se stabilise pour un nombre de couches « origine du rayonnement solaire » compris entre 10 et 30. La méthode qui donne les meilleurs résultats est la méthode 4 « Transmittance et longueur moyenne de transmission (K constant) ». Cette méthode permet de corriger la transmittance en fonction de la longueur réelle parcourue dans la cellule « houppier » tout en conservant les caractéristiques structurale du houppier: le facteur K (proportionnel à G (LAD) et u_f) reste identique lorsque l'on passe de la « feuille » au « houppier ». Cependant, l'erreur relative n'est pas nulle. Elle est certainement

liée à la méthode d'éclairement qui n'est pas complètement uniforme. En effet, même avec un nombre important de couches pour l'origine du rayonnement solaire, l'éclairement de la cellule « houppier » provient de cellules contenues toujours dans un même plan. Il conviendrait de réaliser un éclairement plus uniforme c'est à dire selon plusieurs plans parallèles interceptant la cellule « houppier ». Pour cela, il faudrait que chaque cellule « source » soit génératrice de plusieurs flux incidents.

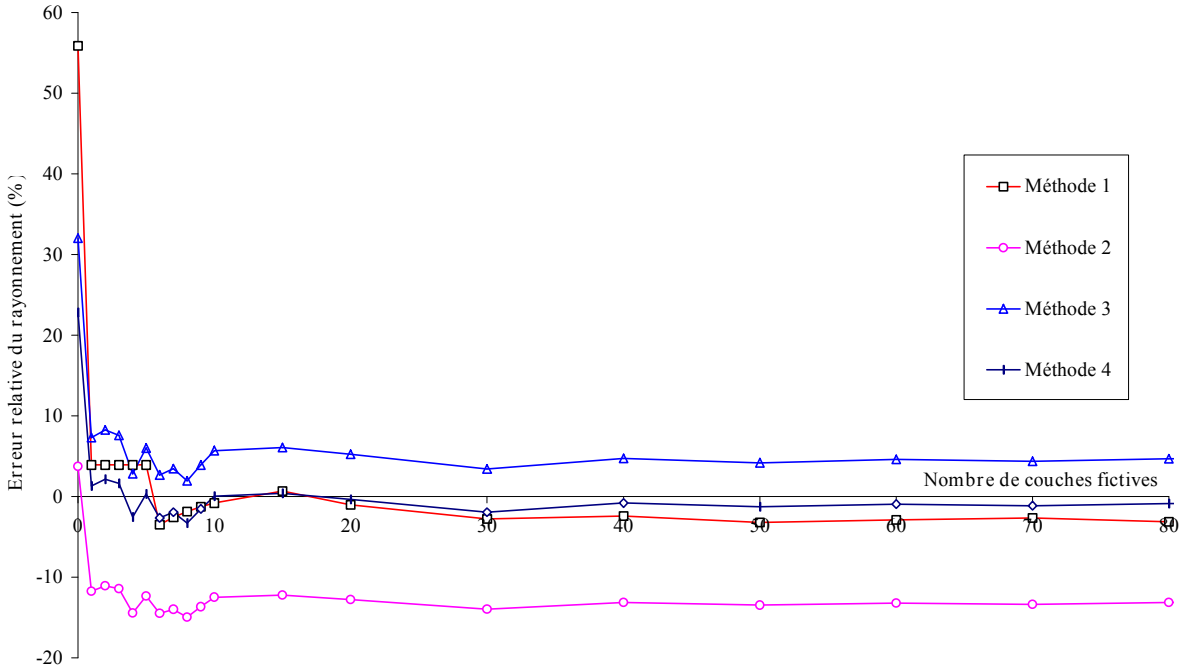


Figure 5-12: Erreur relative du flux intercepté par un houppier de forme cubique pour une simulation à haute résolution spatiale et une simulation « multi-échelle ». Les éléments foliaires du houppier sont distribués de manière sphérique.

Les erreurs relatives ont également été calculées dans le cas d'un houppier cubique avec une distribution angulaire foliaire planophile. Elles sont plus faibles ou du même ordre de grandeur que dans le cas du houppier cubique avec une distribution foliaire sphérique.

Dans le cas de houppiers ellipsoïdaux, les erreurs relatives sont plus importantes même avec la méthode 4. Ceci est certainement lié au fait que la fonction de transmittance a été calculée dans l'étape 1 avec un houppier ellipsoïdal et est ensuite utilisé pour une cellule parallélépipédique ou cubique. Ce résultat met en évidence la nécessité de prendre en compte la forme du houppier pour corriger la longueur réelle de traversée de celui-ci.

III.3.3. Méthode de calcul des flux diffusés par une cellule « houppier »

L'expression des flux diffusés par une cellule de type « houppier » dépend de l'ordre d'itération et du nombre N de rayons qui interagissent avec la cellule.

⇒ Itération k=1:

$$W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} T_{Houp}(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(\Delta l(n),\Omega_s) = T_{SB}(j,\Omega_s,\Omega_v).\sum_{n=1}^{N} W_{int}(\Delta l(n),\Omega_s)$$

⇒ Itération k>1: $W_{total}(\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} < T_{Houp}(j,\Omega_v) >.W_{int}(\Delta l(n),\Omega_{n(n)})$

où $W_{int}(\Delta l(n),\Omega_{n(n)})$ est le flux intercepté sur une longueur Δl dans la direction (Ω_n) par la cellule « houppier » et $< T_{Houp}(j,\Omega_v) >$ est la fonction de phase moyenne telle que:

$$< T_{Houp}(j, \Omega_v) >= \frac{\sum_{s=1}^{N} T_{Houp}(j, \Omega_s, \Omega_v)}{4.}$$

Les configurations testées ont montré que, dans le cas de paysages « ouverts », c'est à dire pour lesquels les diffusions multiples jouent un rôle négligeable, les erreurs relatives entre la BRDF d'un paysage simulé à haute résolution spatiale (DART) et avec l'approche « multi-échelle » sont égales à celles du rayonnement intercepté. Elles dépendent donc de la méthode utilisée pour le calcul de la transmittance du rayonnement solaire. Le cas de paysages où les diffusions multiples jouent un rôle important n'a pas encore été testé. Cependant, il apparaît dans un premier temps, essentiel de résoudre le problème concernant la simulation du rayonnement intercepté par le houppier.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DU CHAPITRE 5

Ce chapitre a permis d'exposer une méthodologie originale pour une modélisation « multi-échelle » de scènes. Cette méthodologie repose sur l'utilisation récursive d'un modèle de transfert radiatif 3-D DART appliqué à différentes échelles d'analyse. Elle consiste à simuler les fonctions de transfert (phase et transmittance) caractéristiques d'éléments de paysage tels que le sous-bois ou les couronnes d'arbres à une résolution spatiale fine puis à les utiliser sur des paysages à une résolution spatiale plus grossière. Ainsi, le nombre d'éléments est diminué lorsque l'on passe de l'échelle locale à une échelle plus régionale. Cette approche a pour objectif de simuler de manière exacte la BRDF de grandes scènes.

Les fonctions de transmittance et de phase ont été calculées pour deux types d'éléments: sous-bois et couronnes d'arbres.

Dans le premier cas, nous avons montré que l'utilisation des caractéristiques optiques du sous-bois calculées avec l'approche « multi-échelle » est très intéressante car elle permet de simuler des paysages avec une résolution spatiale inférieure aux « petits » éléments composant le sous-bois. La réduction du nombre d'« objets » permet de diminuer les problèmes de gestion informatique et donc d'augmenter la taille des scènes à simuler.

Dans le cas des « couronnes d'arbres », la méthodologie avancée est encore à l'étude. Les approches testées ont donné des résultats préliminaires encourageants, en particulier dans le cas de houppiers parallélépipédiques. Une difficulté, prévisible, est apparue: la représentation d'un houppier caractérisé par une forme géométrique, une densité foliaire, etc., par un élément de volume parallélépipédique, a conduit à une mauvaise simulation du rayonnement intercepté. Par rapport au modèle DART actuel, la solution préconisée consiste à réaliser un éclairement uniforme, par exemple avec l'émission de plusieurs flux. Cette approche doit permettre de mieux simuler le rayonnement intercepté total.

D'autre part, il semble particulièrement important de prendre en compte la forme du houppier pour calculer de manière précise le rayonnement solaire intercepté. Il est donc prévisible qu'il faudra prendre en compte la forme moyenne des houppiers. Cette étape ne sera pas pénalisante au niveau des temps de calcul puisque la phase d'illumination avec le modèle DART est très rapide.

Finalement, il conviendra d'introduire, comme avec le modèle DART, la notion de « point milieu » pour pouvoir prendre en compte le point où le rayonnement incident intercepte le houppier. Cette prise en compte est essentielle pour bien représenter la distribution angulaire du rayonnement diffusé par le houppier.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude de la Biosphère Continentale à partir de données de télédétection visible et infrarouge est appelée à bénéficier de plus en plus de notre meilleure compréhension des phénomènes physiques à l'origine de l'information radiométrique mesurée depuis l'espace. Dans ce contexte, les modèles de transfert radiatif appliqués aux surfaces terrestres jouent un rôle primordial, à la fois pour utiliser et développer notre connaissance. La complexité spatiale et temporelle des milieux observés influence fortement leur BRDF. Ainsi, le caractère anisotrope de la réflectance des surfaces terrestres est très bien illustré par les données du capteur spatial POLDER. La multiplicité des paramètres biophysiques mis en jeu dans les interactions à l'origine du signal mesuré explique la difficulté d'interpréter de manière fiable les mesures satellitales avec des modèles physiques à la fois simples et robustes. L'étude bibliographique présentée au début de cette monographie indique que dans de nombreux cas il est nécessaire de recourir à des modèles qui prennent en compte de manière explicite l'architecture des couverts. Ces modèles présentent deux défauts majeurs: des temps calcul très importants et un manque de souplesse d'utilisation.

Mon travail de thèse est centré sur la modélisation 3-D des couverts forestiers. Ainsi, j'ai participé au développement d'un modèle de transfert radiatif original DART. Ce dernier a été conçu pour pallier deux limitations classiques de la plupart des modèles actuels. Il prend en effet en compte l'ensemble des mécanismes physiques majeurs (atmosphère anisotrope, relief, effet de rétrodiffusion, etc.) qui expliquent la réflectance des milieux terrestres. Ceci lui permet de simuler de manière précise la BRDF des couverts hétérogènes 3-D ainsi que les échanges énergétiques à l'intérieur de ceux-ci. D'autre part, le modèle DART offre l'avantage de pouvoir simuler des images. Il apporte donc une information 2-D, souvent essentielle pour interpréter les données de télédétection. J'ai analysé l'apport de la modélisation physique du rayonnement dans le cas particulier de couverts boisés (forêt des Landes), c'est à dire des milieux dont l'environnement radiatif est très complexe. Cette analyse a été conduite dans deux domaines qui présentent un intérêt croissant pour de nombreuses applications : l'analyse spectrométrique et l'analyse texturale des images satellitales. Dans les deux cas, j'ai analysé le potentiel du modèle DART pour déterminer les conditions expérimentales optimales pour extraire l'information thématique recherchée ainsi que la précision escomptée sur cette dernière.

Quoique moins utilisée que l'analyse purement radiométrique, l'analyse texturale est souvent aussi performante pour interpréter les images de télédétection, en particulier pour analyser la structure spatiale des milieux observés. J'ai étudié l'apport de l'information texturale pour le cas d'images à haute résolution spatiale acquises dans le visible et le proche infrarouge. L'approche repose sur des simulations DART réalisées pour différents types de couverts (LAI, écartement et hauteur des arbres, etc.) et diverses configurations expérimentales (résolution spatiale, atmosphère, etc.). Les images simulées ont été essentiellement analysées avec des variogrammes. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de modèles physiques et mathématiques simples peut conduire à une évaluation erronée de paramètres caractéristiques de la texture des images. D'autre part, ils ont permis de mettre en évidence et de quantifier l'influence respective de certains paramètres biophysiques (taux de couverture, LAI, position des arbres, etc.) et des paramètres d'acquisition (configurations angulaires foliaires et d'observation, résolution spatiale). Finalement, une validation partielle a été réalisée avec l'analyse d'images à haute résolution spatiale du capteur aéroporté Push Broom acquises sur la forêt des Landes. Ce travail a permis de déterminer les conditions expérimentales pour lesquelles la texture d'une image peut fournir des informations pertinentes sur les caractéristiques biophysiques du milieu. Cet aspect est particulièrement

important avec la prochaine venue de futurs systèmes satellitaires à très haute résolution spatiale tels que SPOT5.

Un intérêt majeur de la haute résolution spectrale est de renseigner sur le contenu des couverts végétaux en éléments biochimiques (chlorophylle, lignine, azote, etc.). Cette connaissance est souvent essentielle pour connaître le stade phénologique du couvert, étudier son fonctionnement, etc. La plupart des travaux menés à ce jour dans ce domaine sont essentiellement empiriques. Le problème majeur provient du fait que les résultats obtenus sont extrêmement dépendants de la zone d'étude, du milieu et des conditions expérimentales d'acquisition. J'ai étudié ce problème à partir d'une expérience conduite sur le site des Landes avec le spectromètre aéroporté ISM (proche et moyen infrarouge). Dans une première étape, j'ai déterminé par régression pas à pas les équations spectrométriques prédictives des concentrations biochimiques foliaires. La comparaison de ces équations avec celles obtenues avec une expérience similaire conduite deux ans plus tôt avec le spectromètre AVIRIS a confirmé leur variabilité spatiale et temporelle. J'ai donc utilisé la modélisation pour en étudier les causes. J'ai ainsi analysé le domaine de validité d'équations prédictives de l'azote, lignine et cellulose en fonction de paramètres expérimentaux (direction d'observation) et de la variabilité naturelle du couvert (distance entre arbres, taux de couverture, sous bois, etc.). Les résultats obtenus montrent clairement que des équations établies pour une configuration donnée ne sont souvent pas valables pour une autre configuration. Ce problème devra être pris en compte lors de l'utilisation des prochains spectromètres spatiaux.

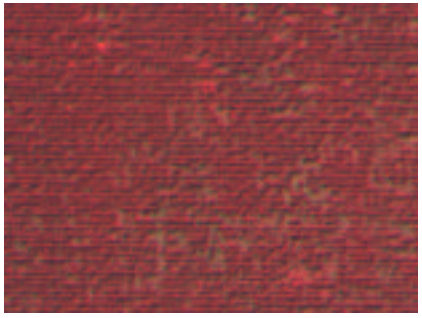
Durant la dernière partie de ma thèse, j'ai analysé de manière très prospective la manière dont la modélisation physique peut contribuer à l'étude d'un problème à la fois commun et fondamental en télédétection : la signification de l'information satellitale acquise à différentes résolutions spatiales. Ce problème survient dans la plupart des études menées avec des données de télédétection: lien entre l'information de terrain et l'information satellitale, lien entre des informations satellitales acquises à différentes résolutions, etc. Ce dernier cas surgira en particulier avec le futur système SPOT 4 pour lequel des données basse et haute résolution pourront être acquises de manière simultanée. Mon objectif est de simuler de manière précise la BRDF de couverts boisés étendus en utilisant uniquement des paramètres biophysiques et optiques susceptibles d'être mesurés sur le terrain. L'approche retenue comprend deux étapes: (1) calcul des propriétés optiques d'éléments "macroscopiques" (houppier, sous bois, etc.) du couvert par un modèle dit à haute résolution, et (2) utilisation de ces propriétés en tant que paramètres d'entrée d'un modèle dit à basse résolution pour qui les éléments de base sont les éléments "macroscopiques " de l'étape (1). L'information nécessaire pour représenter une scène est ainsi minimisée. Ceci permet de considérer de plus grandes scènes et par suite de simuler des acquisitions à basse résolution spatiale. Cette approche a été réalisée avec une utilisation récursive du modèle DART. De très bons résultats ont été obtenus lors de la simulation de couverts boisés où le sous bois est représenté par de simples fonctions de phase. Par contre, pour des houppiers une telle représentation pose des problèmes dont la résolution requiert une importante adaptation du modèle DART. Ainsi, la simulation précise du rayonnement intercepté par les houppiers avec le modèle à basse résolution requiert à la fois la prise en compte de la forme générale des houppiers et l'utilisation d'un éclairement uniforme au niveau de chaque cellule lors de la phase préliminaire d'illumination.

Les résultats présentés dans le cadre de cette thèse ont permis de mettre en évidence à la fois l'intérêt et le caractère "opérationnel" du modèle DART pour l'étude de couverts forestiers. De manière plus générale, ils illustrent l'intérêt de la modélisation physique pour mieux interpréter, et donc mieux exploiter, les mesures de télédétection pour l'étude de la Biosphère Continentale.

ANNEXE I:

COMPOSITIONS COLORÉES RAMI DES PARCELLES DE PINS DE LA FORÊT DE NÉZER

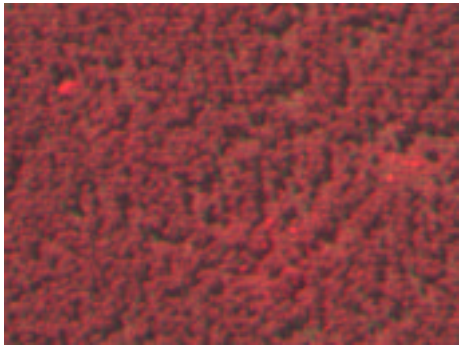
- Parcelles RAMI de la trace N°1:



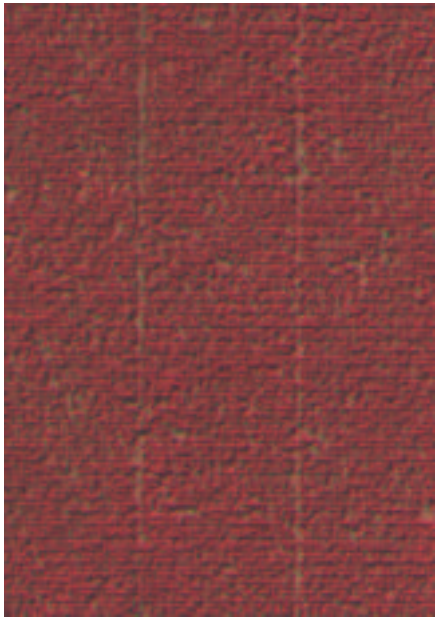
Parcelle 2022 : 11 ans



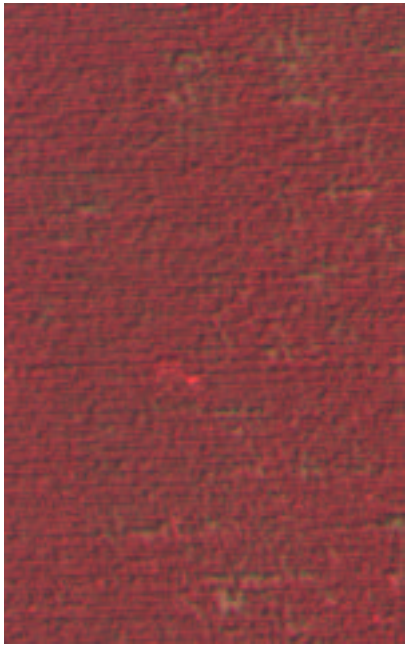
Parcelle 140 : 25 ans



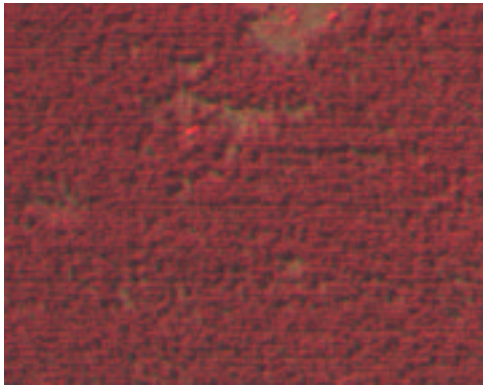
Parcelle 581 : 41 ans



Parcelle 2102 : 13 ans



Parcelle 330 : 16 ans

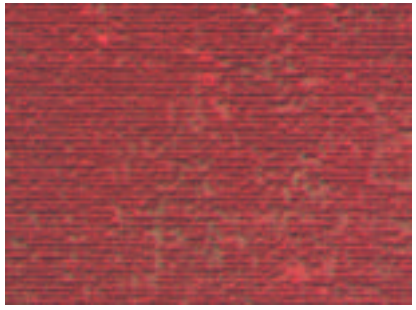


Parcelle 733 : 19 ans

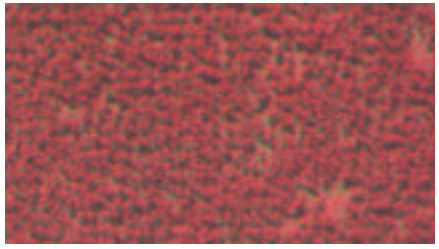


Parcelle 450 : 31 ans

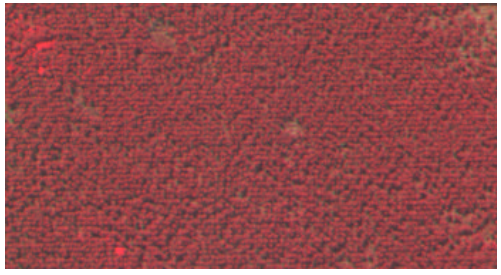
- Parcelles RAMI de la trace N°2



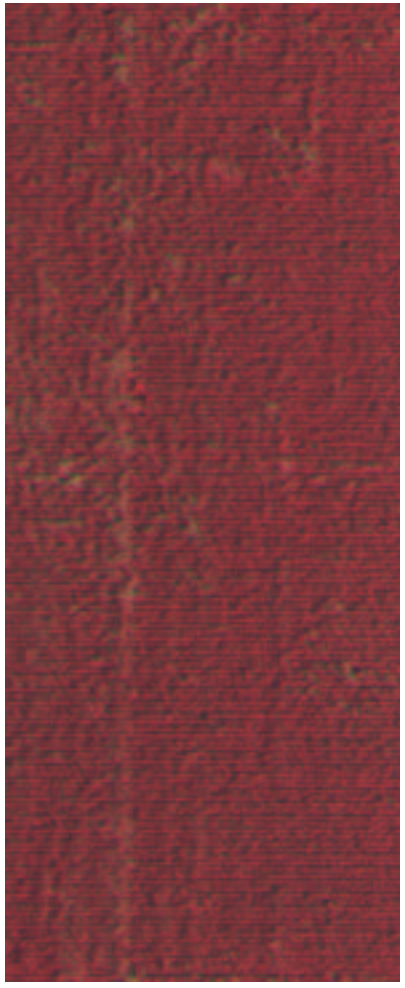
Parcelle 2022 : 11 ans



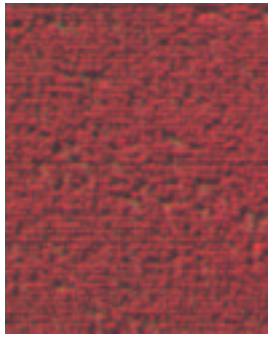
Parcelle 470 : 31 ans



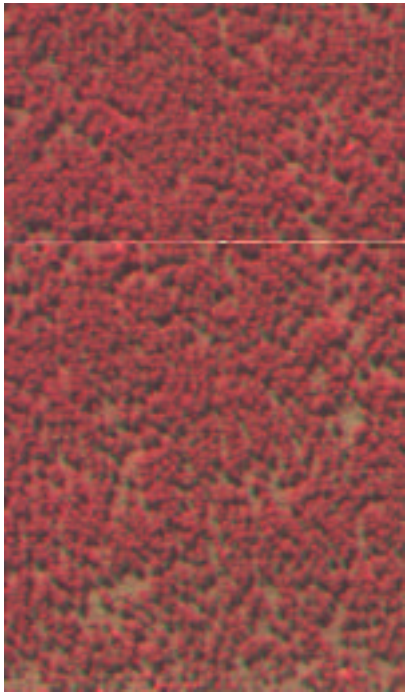
Parcelle 830 : 38 ans



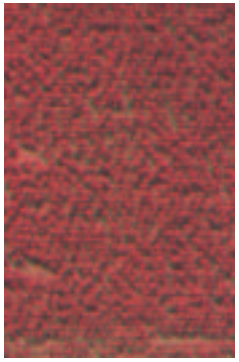
Parcelle 770 : 12 ans



Parcelle 732 : 19 ans

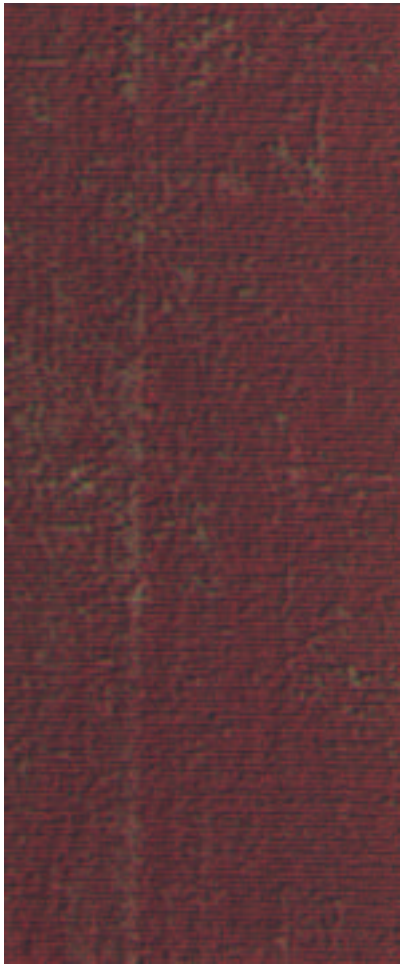


Parcelle 1200 : 43 ans

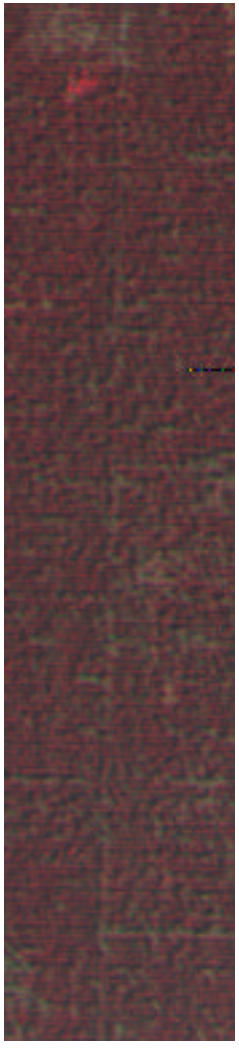


Parcelle 1192 : 20 ans

- Parcelles RAMI de la trace N°3



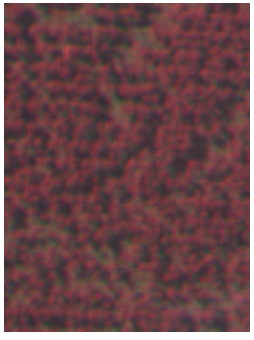
Parcelle 770 : 12 ans



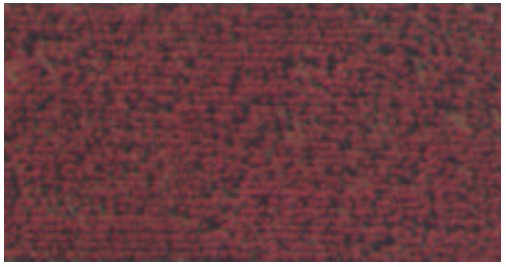
Parcelle 650 : 13 ans



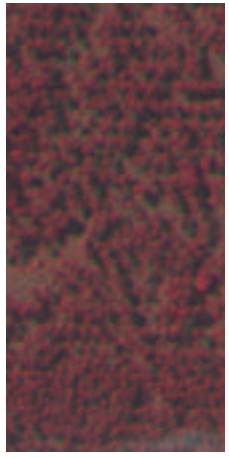
Parcelle 1261 : 20 ans



Parcelle 191 : 40 ans

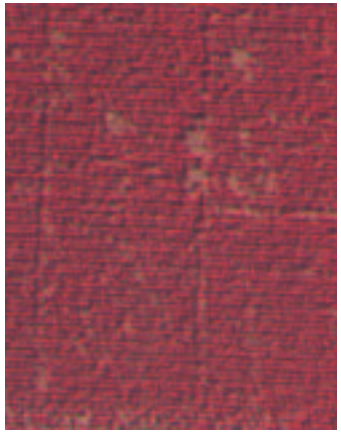


Parcelle 641 : 38 ans



Parcelle 192 : 41 ans

- Parcelles RAMI de la trace N°4



Parcelle 980 : 13 ans



Parcelle 390 : 16 ans



Parcelle 1261 : 20 ans



Parcelle 251 : 24 ans

ANNEXE 2: LE MODELE PROSPECT

Le modèle PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990 ; Fourty et al., 1996) simule les réflectances et transmittances foliaires dans le domaine spectral visible et infrarouge, c'est à dire entre 400 et 2400 nm en fonction des concentrations des différents éléments foliaires et de la structure interne de la feuille.

Les paramètres d'entrée du modèle sont:

- N: indice décrivant la structure interne de la feuille.
- C_{ab}: concentration en chlorophylle a+b ($\mu g.cm^{-2}$)
- C_w: épaisseur équivalente en eau (cm)
- C_{lig}: concentration en lignine ($g.cm^{-2}$)
- C_{prot}: concentration en protéines ($g.cm^{-2}$)
- C_{cell}: concentration en cellulose ($g.cm^{-2}$)
- concentrations d'autres éléments biochimiques tels que l'amidon, le sucre ou l'hémicellulose.

La feuille est considérée comme un empilement de N couches élémentaires de même épaisseur, séparées par de fines couches d'air (Fig. A2-1). Les interactions de surface sont simulées avec les équations de Fresnel (indice de réfraction $n(\lambda)$), alors que les interactions de volume sont décrites par la loi de Beer-Lambert, à partir d'un coefficient d'absorption $K(\lambda)$ fonction des concentrations en chlorophylle, azote, amidon, etc. Ainsi,

$$K(\lambda) = \sum C_i . k_i(\lambda)$$

où $k_i(\lambda)$ est le coefficient d'absorption spécifique et C_i la concentration par unité de surface du composant biochimique i. Le nombre N, appelé indice de structure, n'est pas obligatoirement un nombre entier. Par exemple, pour une jeune feuille de monocotylédone, N varie de 1 à 1.5. Il vaut jusqu'à 2.5 pour une feuille de dicotylédone et 5 pour une feuille sénescente (Jacquemoud, 1992).

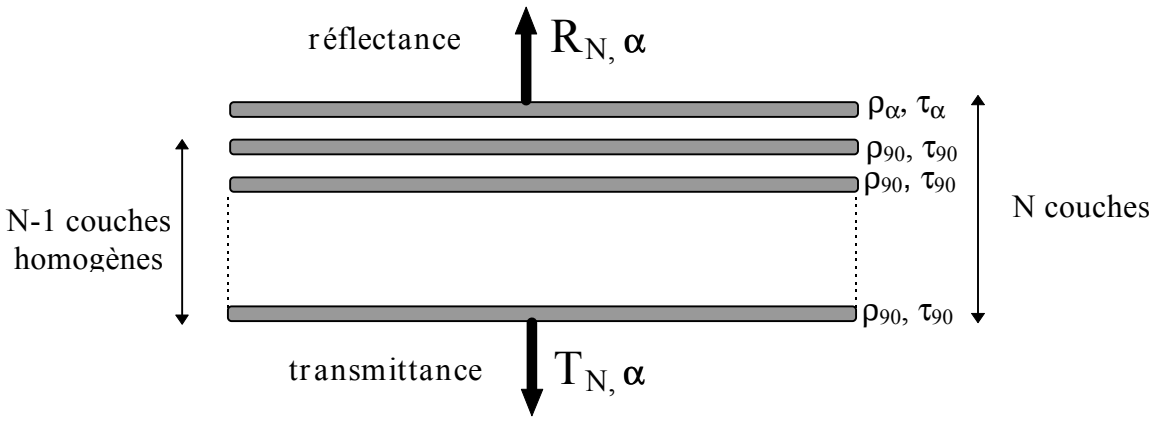


Figure A2-1: Modélisation de la structure interne de la feuille par PROSPECT. L'indice est le demi-angle du cône qui inclue le rayonnement incident sur la feuille. Il vaut 90° pour toutes les couches à l'exception de la première.

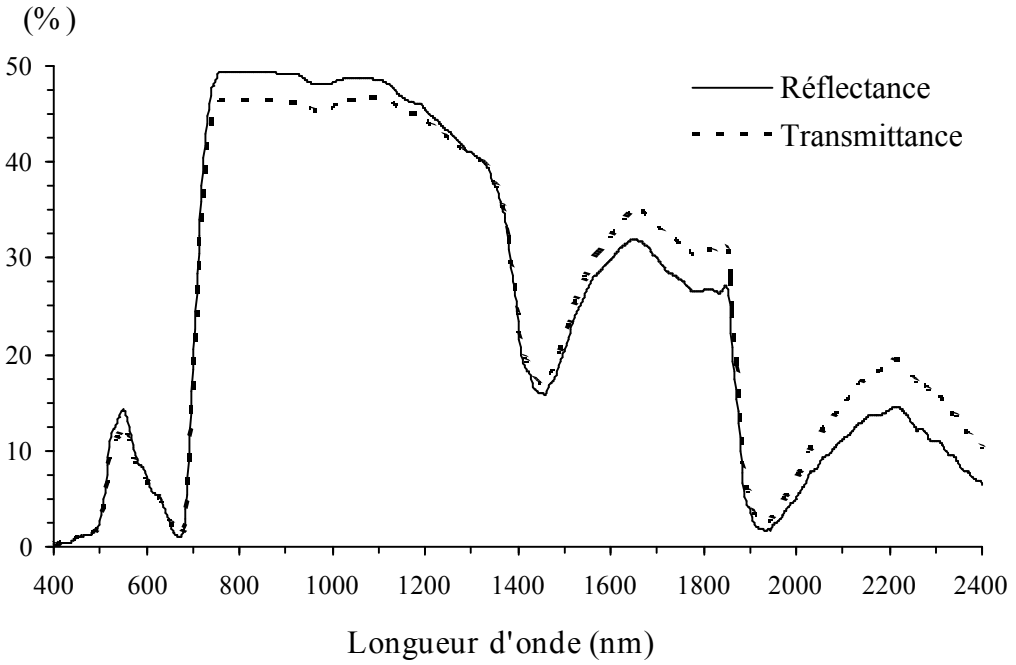


Figure A2-2: Simulation Prospect pour N=2, C_{ab}=50 µg.cm^{-2}, C_w=125 µm, C_{lig}=0.15 g.cm^{-2}, C_{cell}=0.28 g.cm^{-2} et C_{prot}=0.07 g.cm^{-2}.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aber J.D., Wessman C.A., Peterson D.L., Melillio J.M., Fownes J.H., 1990, Remote sensing of litter and soil organic decomposition in forest ecosystems, Remote Sensing of Biosphere Functioning, R.J. Hobbs et H.A. Mooney eds., Springer-Verlag, New York, p.87-103.

Association Of Official Analytical Chemists (A.O.A.C.), 1970, Official methods of analysis, (11th Ed.), Washington D.C.

Barnes R. J., Dhanoa M.S., Lister S.J., 1989, Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra, Applied Spectroscopy, Vol.43, N°5, p.772-777.

Barton F. E., Himmelsbach D.S., Duckworth J. H., Smith M. J., 1992, Two dimensional vibration spectroscopy: correlation of mid- and near-infrared regions, Appl. Spectrosc., Vol.46, p.420-429.

Bibring J.P., Combes M., Langevin Y., Cara C., Drossart P., Encrenaz T., Erard S., Forni O., Gondet B., Ksanfomaliti L., Lelouch E., Masson P., Morotz V., Rocard F., Rosenqvist J., Sotin C., Soufflot A., 1990, ISM observations of Mars and Phobos: first results, Proceedings of the XX lunar planetology science conference, Houston, USA, p.461-471.

Birk E. M., Matson P.A., 1987, Site fertility affects seasonal carbon reserves in loblolly pine, Tree Physiol., Vol.2, p.17-27.

Birk E. M., Vitousek P.M., 1986, Nitrogen availability and nitrogen use efficiency in loblolly pine, Ecology, Vol.67, p.69-79.

Borel C.C., Gerstl S.A.W., Powers B.J., 1991, The radiosity method in optical remote sensing of structured 3D surfaces, Remote Sens. Environ, Vol.36, p.13-44.

Bouchaud M., 1996, Analyse du potentiel de la spectrométrie spatiale pour l'étude de la chimie des couverts, Mémoire de DEA Océan/Atmosphère/Biosphère, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 35 pages.

Burns D.A., Ciurczark, E.W., 1992, Handbook of near-infrared analysis, Practical Spectroscopy, Brame E.G. Eds., New York Academic Press, p.384-431.

Card D.H., Peterson D.L., Matson P. A., Aber J., 1988, Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy, Remote Sens. Environ., Vol.26, p.123-147.

Chandrasekhar S., 1960, Radiative Transfer, Dover Publications, New York.

Cohen M.F., Greenberg D.P., 1985, The hemi-cube - A radiosity solution for complex environments -, SIGGRAPH'85, San Francisco, USA, Vol.19, N°3, p.31-40.

Cohen M.F., Chen S.E., Wallace J.R., Greenberg D.P., 1988, A progressive refinement approach to fast radiosity image generation, Computer Graphics, Vol.22, N°4, p.75-84.

Cohen W.B., Spies T.A., Bradshaw G.A., 1990, Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure, Remote Sens. Environ, Vol.34, p.167-178.

Cooper K., Smith J.A., Pitts D., 1982, Reflectance of a vegetative canopy using the adding method, Apl. Opt., Vol.21, p.4112-4118.

Coulson K.L., 1988, Polarization and intensity of light in the atmosphere, Deepak Publ., Hampton Virginia, USA.

Curran P.J., 1988, The semivariogram in remote sensing: an introduction, Remote Sens. Environ., Vol.24, p. 493-507.

Curran P.J., 1989, Remote sensing of foliar chemistry, Remote Sens. Environ., Vol.30, p.271-278.

Curran P.J., Duggan J.L., Macler B.A., Plummer S.E., Peterson D.L., 1992, Reflectance spectroscopy of fresh leaves for the estimation of chemical concentration, Remote Sens. Environ., Vol.39, p.153-166.

Dave J.V., 1978, Extensive datasets of the diffuse radiation in realistic atmospheric models aerosols and common absorbing gases, Solar energy, Vol.21, p.361-369.

Delhomme J.P., 1976, Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau, Thèse de doctorat, Université de Paris VI.

Demetriades-Shah T. H., Steven M.D., Jeremy A.C., 1990, High resolution derivative spectra in remote sensing, Remote Sens. Environ., Vol.33, p.55-64.

Egan W.G., 1985, Photometry and polarization in remote sensing, Elsevier, New York.

Eotech, 1994, Manuel d'instruction du spectromètre CCD 512 ETA OPTIK, Nozay, Fr.

Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., Schmuck G., Verdebout J., 1996, Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: direct and inverse problems, Remote Sens. Environ., Vol.56, p.104-117.

Gastellu-Etchegorry J.P., Ducrot-Gambart D., 1991, Computer-assisted land cover mapping with SPOT in Indonesia, Int. J. Remote Sensing Vol. 12, N°7, p.1493-1507.

Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F., 1994, Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies, Proceedings EUROPTO of the International Symposium on Satellite Remote Sensing , SPIE VOL.2314, p.38-49, Rome, Italy.

Gastellu-Etchegorry J.P., Zagolski F., Mougin E., Marty G., Giordano G., 1995, An assessment of canopy chemistry with AVIRIS - A case study in the Landes forest, France, Int. J. Remote Sensing Vol.16, N°3, p.487-501.

Gastellu-Etchegorry J.P., Zagolski F., Romier J., 1996a, A simple anisotropic reflectance model for homogeneous multilayers canopies, Remote Sens. Environ, Vol.57, p.22-38.

Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F., 1996b, Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies, Remote Sens. Environ., Vol.58, p.131-156.

Ger, Geophysical & Environmental Research Corporation, 1994, The single field of view iris infrared intelligent spectroradiometer, Millbrook, NY 12545.

Goel N. S., 1988, Models of canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data, Remote Sens. Reviews, Vol.4, N°1, p.1-122.

Goral C., Torrance K.E., Greenberg D., Battaile B., 1984, Modelling the interaction of light between diffuse surfaces, SIGGRAPH Proceedings, Vol.18, N°3, p.213-222.

Goudriaan J., 1977, crop Micrometeorology: A simulation study, Pudoc, Wageningen.

Govaerts Y., Verstraete M.M., 1994, Evaluation of the capability of BRDF models to retrieve structural information on the observed target as described by a three-dimensional rayonnement tracing code, Proceedings of the International Symposium on Satellite Remote Sensing, SPIEEUROPTO, Rome, Italy.

Granberg H. B., 1987, A forest shading model using bit-mapped graphics, Agric. For. Meteorol., Vol. 43, p.225-234.

Grassetie J.C., Checchi E., Stragapede C., 1991, Diffusely reflecting radiosity technique in image synthesis, Commision of the European Communities, Physical Sciences, Luxembourg, 11p.

Guyon D., Riom J., 1996, Estimation de caractéristiques forestières à partir d'images à haute résolution spatiale (SPOT 5), Bulletin de la Société Française de Photogramétrie et de Télédétection, N°141, p.46-50.

Guyon D., Riom J., Moreau P., 1994, Potentialités des analyses de texture en haute résolution spatiale pour la caractérisation de peuplements forestiers, Proceedings of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère, France, p.1053-1060.

Hapke B., 1963, A theorical photometric function for the lunar surface, J. Geophys. Res., Vol.68, p.4571-4586.

Hapke B., 1981, Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory, J. Geophys. Res., Vol.86, p.3039-3054.

Haralick, R. M., 1979, Statistical and structural approaches to texture, Proceeding of the IEEE, Vol. 67, N°5, p. 786-804.

Henyey L.G., Greenstein J.L., 1941, Diffuse radiation in the galaxy, Astrophys. J., Vol.93, p.70-83.

Hruschka W.R., 1987, Data analysis: wavelength selection methods, in Near infrared technology in the agricultural and food industries, P.C. Williams and K.H. Norris Eds., American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, Chap.3.

Idso B., De Wit C.T.,1970, Light relations in plant canopies,Appl. Opt., Vol.9, p.177-184.

Ilwis 1.4, 1993, The Integrated Land and Water Information System, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.

Jacquemoud S., Baret F., 1990, PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra, Remoste Sens. Environ.,Vol. 34, p.75-91.

Jessel J.P., 1993, Modélisation par réseaux d'atomes pour la représentation d'objets et pour l'illumination globale, PhD, Paul Sabatier Univ., Toulouse, France.

Joffre R., Gillon D., Dardenne P., Agneessens R., Biston R., 1992, The use of near-infrared reflectance spectroscopy in litter decomposition studies, Ann. Sci. For., Vol.49, p.481-488.

Johnson L.F., Hlavka C.A., Peterson D.L., 1994, Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the Oregon transect, Remote Sens. Environ., Vol.47, p.216-230.

Jupp D.L.B., Strahler A.H., Woodcock C.E., 1988, Autocorrelation and regularization in digital images: I. Basic theory, IEEE Trans. Geosc. Remote. Sens., Vol.26, N°4, p.463-473.

Jupp D.L.B., Strahler A.H., Woodcock C.E., 1989, Autocorrelation and regularization in digital images: II. Simple image models, IEEE Trans. Geosc. Remote. Sens., Vol.27, N°3, p.247-258.

Jupp D.L.B., Walker J., Penridge L.K., 1986, Interpretation of vegetation structure in Landat MSS imagery: a case study in disterbed semi-arid eucalypt woodland. Part 2: Model-based analysis.,J. Environmental Management,Vol.23, p.35-57.

Kanevski V.A., Ross J., 1983, A Monte-Carlo technique application to studying conifer architecture influence on its spectral brightness coefficient, Sov. J. Remote Sens., Vol.4, p.100-102, in russian.

Kimes D.S., Kirchner J.A., 1982a, Radiative transfer model for heterogeneous 3D scenes, Appl. Opt., Vol.21, p.4119-4129.

Knyazikhin Y., Marshak A., 1991, Fundamental equations of radiative transfer in leaf canopies, and iterative methods of their solution, Photon-vegetation Interactions, R.B. Myneni and J. Ross Eds., p.9-43.

Krige D.G., 1966, Two dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation, Journal of the South African Institute of Mineralogy and Metallurgy, Vol.66, p.13-18.

Kubelka P., Munk F., 1931, Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, Ann. Techn. Phys., Vol.11, p.593-601.

Kuusk A., 1985, The hot spot effect of a uniform cover, Sov. J. Remote Sensing, Vol.3, p.645-658.

Lake L.A., 1991, Analyse des méthodes texturales appliquées au traitement des images, Essai, Département de Géographie et Télédétection, Université de Sherbrooke, 38 pages.

Lejeune J.C., Bonn F., Roux C., Odoux B., 1987, Apport de l'information de texture à la segmentation des images du satellite SPOT en milieu urbain, IEEE Compint'87, p. 173-177.

Li X., Strahler A.H., 1985, Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-23, p.705-721.

Li X., Strahler A.H., 1986, Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy,IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, GE-24, p.906-918.

Li X., Strahler A.H., 1988, Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol.26, p.161-170.

Li X., Strahler A.H., Curtis E.W., 1995, A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol.33, p.466-480.

Liang S., Strahler A.H., 1993, Calculation of the angular radiance distribution for a coupled atmosphere and canopy,IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol.31, p.491-502.

LI-COR, 1991, LAI-2000 : Plant Canopy Analyser, Instruction Manual, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska 68504 USA.

Mandelbrot B., 1975, Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension, Flammarion, Paris.

Marbeau J.P., 1976, Géostatique forestière: état actuel et développement nouveau pour l'aménagement en forêt tropicale,Thèse de doctorat, Université de Paris VI.

Martin M.E., Aber J.D., 1990, Effects of the moisture content and chemical composition on the near infrared spectra of forest foliage, Proc. Imaging Spectroscopy Terrestrial Environ., SPIE 1298, p.171-177.

Matheron G., 1965, Les variables régionalisées et leur estimation, Masson et C^{ie}, Paris.

Matheron G., 1971, The theory of regionalized variables and its applications, Cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, N°5, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Meentemeyer V., 1978, Microclimate and lignin control of decomposition rates, Ecology, Vol.59, p.465-472.

Melillo J.M., Aber J.D., Muratore J.F., 1982, Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics,Ecology, Vol.63, p.621-626.

Meuret M., Dardenne B., Biston R., Boty O., 1993, The use of NIR in predictive nutritive value of mediterraneum tree and shrub, Journal of Near Infrared Spectroscopy, Vol.1, p.45-54.

Minnaert M., 1941, The reciprocity principle in lunar photometry, Astrophys. J., Vol.93, p.403-410.

Murray I., Williams P.C., 1987, Chemicals principles of near infrared, Near infrared technology in the agricultural and food industries, P. Williams and K. Norris Eds., p.17-37.

Myneni R.B., Asrar G., Kanemasu E.T., 1987, Light scattering in plant canopies: The method of successive orders of scattering approximations (SOSA), Agric. For. Meteorol., Vol.39, p.1-12.

Myneni R.B., Gutschick V.P., Shultis J.K., Asrar G., Kanemasu E.T., 1988, Photon transport in vegetation canopies with anisotropic scattering, part IV: Discrete-ordinates finite difference exact kernel technique for photon transport in slab geometry for the two-angle problem,Agric. For. Meteorol, Vol.42, p.101-120.

Myneni R.B., Ross J., Asrar G., 1989a, A review on the theory of photon transport in leaf canopies in slab geometry,Agric. For. Meteorol, Vol.45, p.1-165.

Myneni R.B., Asrar G., Kanemasu E.T., 1989b, The theory of photon transport in leaf canopies, Theory and applications of optical remote sensing , Asrar G. Eds., Wiley, New York, p.167-265.

Myneni R.B., Marshak A., Knyazikhin Y., Asrar G., 1991, Discrete ordinates method for photon transport in leaf canopies, Photon-vegetation Interactions, R.B. Myneni and J. Ross Eds., p.45-109.

Nilson T., 1991, Approximate analytical methods for calculating the reflection functions of leaf canopies in remote sensing applications, Photon-vegetation Interactions, R.B. Myneni and J. Ross Eds., p.161-190.

Otterman J., Weiss G.H., 1984, Reflection from a field of a randomly located vertical protusions, Appl. Opt, Vol.23, p.1931-1936.

Peterson D. L., Hubbard G.S., 1992, Scientific issues and potential remote sensing requirements for plant biochemical content, Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 36, p.446-456.

Pinel V., 1993, Modélisation d'un couvert forestier et de son comportement optique , Mémoire de DEA, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Pinel V., Zagolski F., Gastellu-Etchegorry J.P., Giordano G., Romier J., Marty G., Mougin E., Joffre R., 1994, An assessment of forest chemistry with ISM, Proceedings of the International Symposium on Satellite Remote Sensing, EUROPTO,Rome, Italy.

Pinel V., Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., 1995, Simulation of the BRDF of forest cover with the coupling of high and medium resolution reflectance models, IGARSS'95, Firenze, Italy, Vol.2, p.1477-1479.

Pinty B., Verstraete M.M., Dickinson R.E., 1989, A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soils,Remote Sens. Environ, Vol.27, p.273-288.

Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P., 1992, Numerical Recipes in C. The art of scientific computing, Second edition, Cambridge University Press, 994p.

Ramstein G., Raffy M., 1989, Analysis of the structure of radiometric remotely-sensed images, Int. J. Remote Sensing Vol.10, p.1049-1073.

Ranson K.J., Biehl L.L., 1983, Corn canopy reflectance modeling data set. LARS Tech. Rept. 071584, Purdue Univ., Indiana 47907.

Reyna E. And Badhwar G.D., 1985, Inclusion of specular reflectance in vegetative canopy models, IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., Vol.23, p.731-736.

Rock B.N., Williams D.L., Moss D.M., Lauten G.N. And Kim M., 1994, High-Spectral Resolution Field and Laboratory Optical Reflectance Measurements of Red Spruce and Eastern Hemlock Needles and Branches, Remote Sens. Environ, Vol.47, p. 176-189.

Rondeaux G. And Herman M., 1991, Polarization of light reflected by crop canopies, Remote Sens. Environ, Vol.38, p.63-75.

Ross J.K., Marshak A.L., 1984, Calculation of the solar radiation reflection from plant cover using the Monte-Carlo method, Sov. J. Remote Sens, Vol.5, p.58-67, in russian.

Ross J.K., Marshak A.L., 1984, Dependance of canopy bidirectional reflectance on illumination conditions, calculated by the Monte-Carlo method, Sov. J. Remote Sens., Vol.2, p.96-105, in russian.

Ross J.K., Marshak A.L., 1988, Calculation of canopy bidirectional reflectance using Monte-Carlo method, Remote Sens. Environ, Vol.24, p.213-225.

Sandmeier S., Sandmeier W., Itten K.I., Schaepman M.E., Kellenberger T.W., 1995, The swiss field-goniometer system (FIGOS), IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, p.2078-2080.

Shenk J.S., Westerhaus M.O., 1991, ISI-NIRS-2: Software for Near-Infrared Instruments, Infrasoft International, 149p.

Shenk J.S., Worman J. J., Westerhaus M.O., 1992, Application of NIR spectroscopy to agricultural products, Handbook of Near-Infrared Analysis, Edited by Burns D. A. and Ciurczak E. W. Marcel Dekker Inc.

Siegel R., Howell J.R., 1978, Thermal radiation heat transfer, Hemisphere Publishing Corp.

Sillon F.X., Arvo J.R., Westin S.H., Greenberg D.P., 1991, A global illumination solution for general reflectance distributions, Computer Graphics, Vol.25, p.187-196.

Smith J.A., Oliver R.E., 1972, Plant canopy models for simulating composite scene spectroradiance in the 0.4 to 1.05 micrometer region., Proc. 18th Int. Symp. Remote Sens. Environ., Univ. Mich. Ann. Arbor. Mich., Vol.2, p.1333-1353.

Sparrow E.M., 1963, A new and simpler formulation for radiative angle factors, Journal of Heat Transfer., May 1963, p.81-88.

St-Onge B. A., Cavayas F., 1995, Estimating forest stand structure from high resolution imagery using the directional variogram, Int. J. Remote Sensing, Vol. 16, N°11, p. 1999-2021.

Suits G.H., 1972, The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy, Remote Sens. Environ, Vol.2, p.113-129.

Tanaka S., 1969, Estimation of sunlit leaf area in tobacco plant community by the Monte-Carlo method. Estimation on direct sunlight. In: Photosynthesis and utilisation of solar energy. Level III Exp 1968, J IBP/PP-Photosynthesis Level III Group, Tokyo, p.76-79.

Tanre D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Mocrette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y. , 1990, Description of a computer code to Simulate the Satellite Signal in the Solar Spectrum: The 5S code.,Int. J. Remote Sensing Vol. 11, N°4, p. 659-668.

Tanre D., Herman M., Deschamps P.Y., De Leffe A., 1979, Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties, Applied Optics, Vol. 18, N°4, p. 3587-3594.

Tomppo E., 1986, Models and méthods for analysing spatial patterns of trees, Helsinki 1986.

Vanderbilt V.C., Grant L. And Ustin, 1985, Plant canopy specular reflectance model, IEEE Trans. Geosc. Remote Sens, Vol.23, p.722-730.

Vanderbilt V.C., Grant L. And Ustin, 1991, Polarization of light by vegetation, Photon-vegetation Interactions, R.B. Myneni and J. Ross Eds., p.191-228.

Van Soest P.J., Wine R.H., 1968, Determination of lignin and cellulose in acid-detergent fiber with permanganate, Journal of Association of Official Analytical Chemists, Vol.51, p.780-785.

Vauclin M., 1982, Spatial varaibility of surface temperature along two transects of a bare soil, Water Resources Research, Vol.18, p.1677-1686.

Verhoef W., Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model,Remote Sens. Environ, Vol.16, p.125-141.

Vitousek P.M., 1982, Nutrient cycling and nutrient use efficiency, Am. Nat. Vol.119, p.472-553.

Waksman A., Rosenfeld A., 1996, Sparse, opaque three-dimensional texture, 2B: Photometry, Pattern Recognition,Vol.29, N°2, p297-313.

Walthall C.L., Norman J.M., Welles J.M., Campbell G., Blad B.L., 1985, Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces, Appl. Opt., Vol.24, p.383-387.

Webster J.R., Benfield E.F., 1986, Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems, Ann. Rev. Ecol. Syst.,Vol.17, p.567-594.

Wenhan Q., Yueqin X., 1994, On the hotspot effect of leaf canopies: modeling study and influence of leaf shape,Remote Sens. Environ, Vol.50, p.95-106.

Wessman C., Aber J., Peterson D., 1989, An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry,Int. J. Remote Sensing Vol.10, N°8, p.1293-1316.

Wessman C.A., 1990, Evaluation of canopy biochemistry, Remote sensing of biosphere functioning, R. J. Hobbs et H.A. Mooney Eds., Springer-Verlag, New York, p.135-156.

Williams P., Norris K.H., 1990, Near infrared technology in the agricultural and the food industries, St. Paul, Minnesota.

Woodcock, C. E., Stralher, A. H., Jupp, D. L. B., 1988a, The use of variograms in remote sensing: I. Scenes models and simulated images, Remote Sens. Environ., Vol. 25, p. 323-348.

Woodcock, C. E., Stralher, A. H., Jupp, D. L. B., 1988b, The use of variograms in remote sensing: II. Real digital images,Remote Sens. Environ, Vol. 25, p. 349-379.

Zagolski F., Gastellu-Etchegorry J.P., Marty G., Giordano G., Mougin E., 1992, Preliminary results of the ISM campaign - The Landes, South West France -, IGARSS'92, Houston, Texas, p.6-8.

Zagolski F., 1994, Evaluation des concentrations chimiques d'un couvert forestier à l'aide de la haute résolution spectrale, Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 172 pages.

Zagolski F., Gastellu-Etchegorry J.P., 1995, Atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of 5S model, Int. J. Remote Sensing, Vol.16, N°16, p.3115-3146.

Zagolski F., Pinel V., Romier J., Alcayde D., Fontanari J., Gastellu-Etchegorry J.P., Giordano G., Marty G., Mougin E., Joffre R., 1996, Forest chemistry with high spectral resolution remote sensing, Int. J. Remote Sensing Vol.17, N°6, p.1107-1128.

Zibordi G., Voss K.J., 1989, Geometrical and spectral distribution of sky radiance: Comparison between simulations and field measurements, Remote Sens. Environ., Vol.27, p.343-358.